

Rapport d'activité de Philippe Roux - 2010

Résumé

Philippe Roux est un physicien expérimentateur possédant une solide formation en acoustique aussi bien à l'échelle ultrasonore du domaine médical (mm) qu'à l'échelle de l'acoustique sous-marine (km). Pendant sa thèse au Laboratoire Ondes et Acoustique (94-97), il a étudié en régime ultrasonore les phénomènes de diffusion multiple et l'interaction son-vorticité grâce au concept du retournement temporel. Il poursuit sa thèse par un post-doc au Marine Physical Lab (Sept. 97), où il approfondit ses connaissances théoriques et numériques en acoustique sous-marine. Recruté au CNRS, il continua au LOA (Jan. 99-Déc. 01) son travail sur la cohérence du champ acoustique dans les cavités fortement réverbérantes en présence de diffusion multiple. Il travailla aussi sur le concept de résonateur acoustique pour les ondes élastiques dans les solides. De retour à San Diego (Jan. 02-Juil. 05), en détachement du CNRS, il créa et développa un laboratoire d'acoustique ultrasonore au sein du Scripps Institution of Oceanography où il obtint un poste de Chercheur Associé en Jan. 04. Sa recherche s'oriente alors vers la cohérence spatio-temporelle du bruit ambiant en acoustique sous-marine et en géophysique. Malgré une grande implication dans les travaux expérimentaux à l'échelle du laboratoire, il passa aussi plus de trois mois en mer sur des projets de recherche à grande échelle. Depuis juillet 05, il est de retour au CNRS à Grenoble où il a créé l'Equipe d'Acoustique Expérimental au sein du LGIT. Les interactions restent fortes avec San Diego où il passe un mois par an depuis son retour en France. Ses thèmes de recherche sont centrés sur la propagation d'ondes acoustiques/élastiques en milieu complexe avec une prédilection pour les expériences multi-échelles mêlant laboratoire et travail de terrain. Philippe Roux a été promu DR en octobre 2009.

Table des matières	Pages
A-Rapport d'activité	
Résumé	1
A.1- Curriculum Vitae	2
A.2- Recherche scientifique	3
1- Introduction	3
2- Géophysique	7
3- Acoustique sous-marine	14
4- Annexe	25
A.3- Enseignement, formation et diffusion de la culture scientifique	27
A.4- Transfert technologique, relations industrielles et valorisation	29
A.5- Encadrement, animation et management de la recherche	31
B- Objectifs	32
Références	39

A.1- Curriculum Vitae

Etat Civil

Philippe ROUX,
né le 10 février 1969 à Lyon (Rhône)
marié, six enfants

résidant : 26, rue Raoul Blanchard
38000 Grenoble

Formation

- 2001 Habilitation à Diriger les Recherches, Université Paris VI, soutenue le 6 juillet 2001.
1997 Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, spécialité Physique des Liquides, soutenue le 5 mai 1997 avec la mention très honorable et les félicitations du jury.
1993 D.E.A de Physique des Liquides, Université Paris VI, mention Bien.
1991 Magistère Inter-universitaire de Physique, Ecole Normale Supérieure.
1989 Entrée à l'Ecole Normale Supérieure.

Activités professionnelles

- Depuis 10/09 Directeur de Recherche DR2 au LGIT.
07/05-09/09 Chargé de Recherche CR1 au LGIT, UMR 5559, Université Joseph Fourier, Grenoble.
01/04-07/07 Research Associate (tenured position) au MPL.
01/02- 01/04 Visiting Scientist au Marine Physical Laboratory (MPL), Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego, USA.
12/98- 12/01 Chargé de Recherche CNRS (CR2, puis CR1 en octobre 2001) au LOA.
9/97 – 11/98 Stage post-doctoral au Marine Physical Laboratory, Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego, USA.
1994 - 1997 Thèse au Laboratoire Ondes et Acoustique (LOA), UMR 7587, Paris.

Distinctions

- Lauréat d'une Chaire d'Excellence Junior (ANR, 250 k€), juillet 2005.
Fellow of the Acoustical Society of America, novembre 2004.
Member of the Acoustical Society of America, décembre 2002.
Lauréat d'une ACI blanche Jeune Chercheur (1 MF), juillet 2000.

Publications et Citation index (Janvier 2010)

- 82 articles dans des journaux à comité de lecture, 1 chapitre de livre, 33 actes de conférences internationales, 105 participations orales dans des congrès internationaux dont 15 conférences invitées.
- Citation index = 1285, h-index = 20 (données ISI Web of Knowledge)

A.2- Recherche scientifique - De janvier 2006 à janvier 2010

1- Installation d'un physicien au sein d'un laboratoire de géophysique (LGIT) : Exploitation d'une plateforme expérimentale de spectroscopie physique multi-échelles

L'acoustique connaît depuis quelques années un essor important matérialisé par l'apparition d'applications aussi nombreuses que variées, tant sur le plan fondamental que technologique. En premier lieu, les ondes acoustiques ou élastiques ayant la faculté de se propager sur de longues distances dans de nombreux milieux matériels (fluides ou solides), éventuellement opaques à la lumière, constituent un outil de diagnostic efficace au même titre que les rayons X ou les faisceaux de neutrons. En tant qu'outil de diagnostic, la spécificité de l'acoustique repose entre autre sur le fait que les longueurs d'ondes acoustiques peuvent être importantes (comparées à celles des ondes électromagnétiques), autorisant l'analyse des propriétés de milieux complexes à des échelles dites mésoscopiques (par exemple : systèmes biologiques, milieux composites). En second lieu, de nombreux phénomènes physiques s'accompagnent de l'émission d'ondes acoustiques : bruit aérodynamique en turbulence, émission acoustique lors de la propagation de fractures, ondes sismiques en géophysique pour n'en citer que quelques unes. Enfin, sur un plan plus fondamental, les ondes acoustiques sont caractérisées par des fréquences basses et de grandes longueurs d'ondes (comparées par exemple aux ondes lumineuses du domaine visible). Les ondes acoustiques autorisent donc une étude expérimentale simple de phénomènes ondulatoires complexes comme la localisation ou la diffusion multiple : on dispose en particulier de transducteurs acoustiques dont la linéarité permet d'accéder à l'information de phase (d'accès plus difficile dans le domaine optique).

L'étude des ondes acoustiques ou élastiques est à la base d'un très grand nombre d'applications dans des domaines de la physique aussi variés que la physique du solide (tests de circuits intégrés par microscopie acoustique en champ proche) ou l'astrophysique (héliosismologie). Sans prétendre être exhaustifs, citons :

- dans le domaine bio-médical, tout ce qui touche à l'échographie : du fœtus, du cœur, de la main, des flux sanguins voire du cerveau. L'acoustique est aussi utilisée comme thérapie : la lithotritie (destruction des calculs rénaux), l'hyperthermie (brûler une tumeur en focalisant les ondes acoustiques) en sont de bons exemples.
- en océanographie, l'acoustique est le seul type d'onde habilitée à détecter et localiser des sources (SONAR), compter la bio-masse (poissons, plancton), transmettre de l'information ou encore imager les caractéristiques des fonds sous-marins.
- la localisation et le suivi de l'activité sismique et volcanique et la compréhension de la structure interne de la Terre sont rendus possibles par l'enregistrement des ondes élastiques engendrées tout autour du globe par les tremblements de terre. Dans le même champ de discipline (géophysique) l'exploitation pétrolière (sur

- terre et en mer) repose elle aussi sur une étude du sous-sol par les ondes élastiques qui s'y propagent.
- tout ce qui touche à l'audition, la voix, la musique ou le bruit est, bien entendu, un domaine où la propagation des ondes sonores joue un rôle central. Outre les problèmes de réverbération (acoustique des salles), sont apparus récemment, dans ce domaine, des problèmes liés à la conception de sources « intelligentes » permettant de localiser simultanément au moyen d'un dispositif unique, des messages différents parlés dans des lieux distincts.
 - plus généralement, la physique des ondes acoustiques et élastiques est à l'origine du développement du contrôle non-destructif, de la thermo-acoustique et plus récemment de la sonoluminescence.

Ces multiples applications de l'acoustique s'appuient notamment sur des développements rapides de l'électronique (systèmes d'acquisition et d'échantillonnage rapide), des matériaux composites et piézo-électriques (physique des matériaux) et des capacités numériques des ordinateurs (traitement de l'information). Elles sont à la base de l'intérêt croissant des chercheurs et des industriels pour les ondes acoustiques et élastiques.

L'acoustique est à l'interface de plusieurs disciplines particulièrement actives dans la région Rhône-Alpes et plus particulièrement à Grenoble : la physique, la mécanique, la géophysique, le traitement du signal, la médecine et la biologie. Ainsi, plusieurs laboratoires de Grenoble ont déjà inscrit l'acoustique, en milieu solide ou fluide, au nombre de leurs thèmes de recherche. Il s'agit notamment du LGIT pour la géophysique, du LPM²C dans l'étude fondamentale de la diffusion multiple, de l'Institut Néel pour le contrôle non destructif, du LEGI dans le domaine de l'interaction sonovorticité ou encore du GIPSA-Lab en traitement du signal. Les chercheurs impliqués ont pu confronter leurs approches et leurs résultats à travers les Groupes de Recherche interdisciplinaires POAN, PRIMA, ONDES, IMCODE et MESOIMAGE à partir de 1994.

Lors de ce quadriennal, l'axe principal de mon travail fut de développer l'Equipe d'Acoustique Expérimentale créé à mon arrivée au LGIT en juillet 2005. La spécificité et l'originalité du laboratoire est de travailler avec une plateforme expérimentale multi-échelles à vocation pluridisciplinaire sur laquelle s'appuieront plusieurs laboratoires dans le domaine de la physique ondulatoire.

Ce travail de recherche repose sur mon bagage scientifique en acoustique ultrasonore et sur plusieurs années d'expérience dans un grand laboratoire de recherche américain. En effet, lors de mon séjour à UCSD, San Diego (2002-2005), j'ai créé et développé un laboratoire ultrasonore dans lequel j'ai reproduit à échelle réduite les phénomènes de propagation acoustique observés dans l'océan. En contrôlant à loisir l'ensemble des paramètres du milieu (vague, nombre et profondeur des sources, fluctuations de température, densité du fond), cet outil a permis de faire des progrès méthodologiques dans le domaine de la tomographie océanique, de la détection de cibles en milieu peu profond, de la communication sous-marine, ... J'ai reproduit cette

plateforme ultrasonore à Grenoble et mon but est d'étendre son champ d'investigation à la géophysique et plus généralement à la propagation d'ondes acousto-élastiques en milieu complexe. Ainsi, un modèle de croûte terrestre peut être reproduit à l'échelle du laboratoire pour étudier la conversion de l'énergie générée par les microséismes océaniques en ondes de Rayleigh sur le continent. De la même façon, la propagation acoustique en régime de diffusion multiple dans les nuages de bulles rend compte à une échelle mésoscopique (et donc facile à manipuler) de phénomènes ondulatoires observés à l'échelle cristalline.

En fait, deux mots-clés sont à la base de mon travail de recherche : (1) les approches multi-échelles et (2) les réseaux multi-éléments.

- (1) On appelle milieu complexe pour les ondes tout milieu pour lequel la propagation est dominée par les phénomènes de réfraction, dispersion, diffusion et/ou réverbération. Aborder un phénomène ondulatoire complexe simultanément à l'échelle réelle et à l'échelle du laboratoire permet de simplifier voire de contrôler cette complexité en jouant séparément sur différents paramètres. Ainsi, en reprenant l'exemple de la tomographie océanique, un chenal acoustique sous-marin se transforme en un guide d'onde à l'échelle ultrasonore, guide d'onde dans lequel on peut contrôler à loisir la hauteur des vagues qui jouent un rôle important sur l'aspect aléatoire de la propagation acoustique.

- (2) A l'échelle réelle comme à l'échelle du laboratoire, il n'y a plus aujourd'hui de limitation technologique à l'utilisation de réseaux de sources/récepteurs dans l'étude des phénomènes ondulatoires en acoustique. Cependant, l'utilisation de réseaux multi-éléments est à double tranchant : d'un côté, on multiplie les angles de vue sur la propagation des ondes et on améliore de cette façon la résolution comme cela fut démontré récemment en tomographie sismique passive [Shapiro et al, 2005] ; d'un autre, on augmente énormément la quantité d'information à enregistrer, traiter et exploiter au risque de perdre de vue l'aspect physique du phénomène.

En fait, en conjuguant multi-échelles et multi-éléments, on cherche à simplifier la complexité des milieux naturels (terre, mer) tout en conservant la résolution spatiale nécessaire dans l'étude de la propagation des ondes. Le but ultime est d'utiliser les ondes pour caractériser au mieux un milieu naturel, d'apprécier sa complexité et la réduire, de le décrire correctement à des fins d'imagerie ou de prospection, d'augmenter nos connaissances en géophysique, en acoustique ou en physique fondamentale.

Pour réaliser des expériences multi-échelles et multi-éléments sur le terrain et en laboratoire, j'ai équipé l'Equipe d'Acoustique Expérimentale de plusieurs électroniques d'acquisition et des capteurs sources/récepteurs associés. Ces outils permettent d'étudier des phénomènes de physique ondulatoire sur six décades en fréquence allant du Hz au MHz (voir Annexe page 25). A l'aide de ces systèmes, mon équipe multiplie les approches multi-échelles et l'utilisation de réseaux multi-éléments pour appréhender la propagation d'ondes acoustiques et élastiques en géophysique, en acoustique sous-marine et dans les régimes ultrasonores mêlant la diffusion multiple et l'interaction son-vorticité. Ces sujets pluridisciplinaires ont été abordés en collaboration avec des chercheurs du

LGIT (géophysique), du LPM²C (physique fondamentale), du LEGI (dynamique des fluides) et du LIS (traitement du signal).

Dès 2003, mon projet de recherche a reçu un fort soutien des instances nationales de la recherche, à savoir :

- un Plan Pluri-Formation financé par le Ministère de la Recherche pour la mise en place du Laboratoire d'Acoustique Expérimentale de l'UJF doté de 120 000 euros entre 2003 et 2006,

- une Chaire d'Excellence Junior 2005 de 250 000 euros accordée par l'ANR pour le développement du Laboratoire d'Acoustique Expérimentale au sein du LGIT sur la période 2006-2008,

- un financement INSU-mi lourd de 50 000 euros pour l'équipement de l'Equipe d'Acoustique Expérimentale en 2005-2006,

- un financement du Ministère de la Recherche (MSTP – DSPT3) de 40 000 euros pour les frais d'infrastructure du Laboratoire d'Acoustique Expérimentale en 2005-2006.

D'un point de vue chronologique, je suis arrivé en juillet 2005 au LGIT pour créer et diriger l'Equipe d'Acoustique Expérimentale. De 2005 à 2009, j'ai encadré deux thèses sur des thèmes propres à la géophysique au LGIT et à l'acoustique sous-marine avec le Gipsa-Lab. Ces thèses m'ont permis de prendre mes marques au sein du labo et plus généralement de l'OSUG en cherchant à mêler géophysique et physique des milieux complexes. Eric Larose nous a rejoints en post-doc en avril 2006, poste qui s'est rapidement transformé en poste de CR2 (section 5) à l'automne 2006. Par la suite notre équipe a continué à s'étoffer en septembre 2007 avec l'arrivée de Stefan Catheline (ex-Maitre de conférences au LOA) en délégation CNRS. L'Equipe d'Acoustique du LGIT ayant obtenu de l'UJF un poste de Maitre de conférences au printemps 2008, nous avons pu transformer la délégation CNRS de Stefan en poste permanent. Coté recherche, nous co-encadrons tous les deux un nouveau doctorant depuis septembre 2007 sur le thème de l'imagerie sismique du corps humain. Coté personnel technique, le CNRS nous a offert un poste d'Assistant Ingénieur au titre de la mobilité NOEMI au printemps 2008. Par ailleurs, deux post-docs se sont succédé en 2008 et 2009 sur des thèmes liés à la signature des variations temporelles dans un milieu en régime de diffusion multiple à partir de nos maquettes de laboratoire. Enfin, trois nouveaux doctorants ont commencé leur thèse sous ma responsabilité en septembre 2008 et 2009.

Ainsi, début 2010, l'Equipe d'Acoustique Expérimentale dont j'assume la direction scientifique est constituée de trois chercheurs à temps plein, de deux post-docs, d'un assistant ingénieur et de cinq doctorants.

Par ailleurs, dans le cadre de la rénovation des bâtiments du LGIT, l'Equipe d'Acoustique Expérimentale s'est vue attribuée deux salles expérimentales toutes neuves pour une surface totale de 185 m². C'est dans ces nouveaux locaux livrés en décembre 2007 que les activités de recherche décrites ci-après prendront leur essor dans les années à venir. Pour info, la visite virtuelle de l'équipe a été mise en ligne sur le site du CNRS sur <http://www.cnrs.fr/cnrs-images/multimedia/lgit/pages/ondes/ondes09.html> et <http://www.cnrs.fr/cnrs-images/multimedia/lgit/pages/ondes/ondes10.html>).

Du point de vue scientifique, mon travail de recherche repose sur la réalisation d'expériences pluridisciplinaires utilisant les ondes acoustiques ou élastiques à différentes échelles et impliquant des chercheurs ou des équipes de plusieurs laboratoires nationaux et internationaux. Le thème de la propagation des ondes acoustiques/élastiques en milieu complexe sera l'axe de recherche principal de mon équipe. Ce thème sera largement développé ci-dessous dans les chapitres 2 et 3, respectivement dans le domaine de la géophysique et de l'acoustique sous-marine.

2- Géophysique

Le LPM²C (Grenoble), le LOA (Paris) et le LGIT animent depuis de nombreuses années déjà un Groupe de Recherche sur la propagation d'ondes en milieu hétérogène (GDR POAN, PRIMA et IMCODE de 1994 à 2008), ce qui nous a permis d'acquérir un langage commun. Le meilleur exemple de cette interdisciplinarité est le dynamisme actuel de la recherche autour du thème de l'imagerie passive en géophysique, en acoustique sous-marine et dans le domaine des ultrasons. La tomographie passive se résume au double problème suivant :

- 1) Peut-on extraire du bruit ambiant mesuré en deux points la fonction de Green entre ces deux points ?
- 2) La qualité de la fonction de Green extraite du bruit est-elle suffisante pour reconstruire une image du milieu ?

Ces dernières années, des expériences ont validé le premier point dans tous les domaines de la physique ondulatoire. La fonction de Green émerge de la corrélation d'un champ diffus mesuré en deux points sur de longues périodes de temps. Le champ diffus est issu du bruit ambiant (comme en géophysique [Shapiro et al, 2005a] ou en acoustique sous-marine [Sabra et al, 2005a]) ou de codas de sources actives en régime de diffusion multiple (comme en géophysique [Campillo and Paul, 2003] et en acoustique ultrasonore [Derode et al, 2003 ; Lobkis and Weaver, 2001]).

En revanche, dans la plupart des cas, seule une estimation de la fonction de Green est obtenue, estimation qui dépend principalement de la distribution spatio-temporelle des sources de bruit utilisées. Ainsi, en géophysique, l'onde de Rayleigh est facilement obtenue car cette onde est largement excitée par les sources de bruit ambiant de type « océanique » dans la gamme de fréquence [0.1-0.2 Hz]. En acoustique sous-marine, la fonction de Green est pondérée en amplitude par le fait que les sources de bruit sont dues aux vagues à la surface de l'océan. De nombreux travaux théoriques ont étudié le problème en espace libre, dans un guide d'onde ou dans une cavité [Roux et al, 2005 ; Snieder, 2004 ; Sabra et al, 2005b]. La variance de la fonction de corrélation et sa convergence vers la fonction de Green ont été étudiées de façon théorique et expérimentale. Enfin, le bruit ambiant étant souvent difficile à maîtriser, le problème a aussi été approché en utilisant une distribution de sources incohérentes et non maîtrisées, comme le bruit d'un bateau en mer ou la coda d'une collection de séismes en

géophysique [Roux et al, 2004a ; Sabra et al, 2005a].

Concernant le deuxième point mentionné ci-dessus, il reste bien entendu beaucoup à faire et à comprendre dans le domaine de la tomographie passive. En particulier, reconstruire une image du milieu à partir du simple bruit ambiant est un problème passionnant. Une première carte de vitesse d'ondes de surface a été obtenue en Californie du sud début 2005 à partir d'ondes de Rayleigh [Shapiro et al, 2005a]. Plus récemment, la faille de San Andreas a été imagée dans la région de Parkfield (Californie) via l'extraction d'ondes de volume (ondes P) du bruit sismique ambiant.

Ces résultats très encourageants montrent que nous pourrions atteindre notre objectif en géophysique à des échelles locales (<20 km) en utilisant des ondes de volume, et globales (~1000 km) via les ondes de surface (Rayleigh ou Love) [Roux, 2009]. Dans les deux cas, l'inversion tomographique est faite à partir des temps de trajets mesurés entre sismomètres en utilisant un noyau d'inversion basé sur le tracé de rayons. Contrairement à une tomographie classique où la mesure des temps est issue de sources actives maîtrisées, la tomographie passive est le fruit de la corrélation de bruit ambiant dont on espère qu'il satisfait à des conditions de stationnarité et d'isotropie dans la bande spectrale considérée. La qualité ou les biais observés sur l'inversion tomographique est ainsi directement liée aux propriétés spatiales et temporelles du bruit ambiant.

Ainsi, au delà des premières images remarquables révélant la typographie de la croûte terrestre par tomographie passive en ondes de surface [Shapiro et al, 2005a], vient le temps des questions quant à la fiabilité des résultats et aux aspects méthodologiques de la tomographie passive. On sait par exemple que le bruit microsismique est d'origine océanique dans la bande [0.1-0.2 Hz]. La directivité de ce bruit ambiant produit des fonctions de corrélation très différentes pour un couple de sismomètre d'un mois à l'autre au cours d'une année [Stehly et al, 2006], mais aussi de jour en jour, voire d'heure en heure (Fig. 1) en fonction du déplacement des tempêtes dans l'océan. Quels sont ainsi les biais observés en tomographie passive du fait de l'instationnarité et de l'anisotropie des sources de bruit [Froment et al, 2009]? Peut-on isoler des observables qui soient indépendantes de ces fluctuations et qui caractérisent malgré tout la structure géologique locale ?

C'est dans cette direction que se sont orientées mes recherches dans le cadre générale de la tomographie passive par corrélation de bruit ambiant [Roux, 2009].

Avec notre expérience en tomographie passive à grande échelle (>km), notre objectif fut de travailler à l'interface terrain-laboratoire sur des problématiques qui mettent en jeu l'utilisation du bruit ambiant à des fins d'imagerie. Les trois exemples suivants (2.1 à 2.3) donnent un aperçu des expériences effectuées au sein de l'Equipe d'Acoustique Expérimentale.

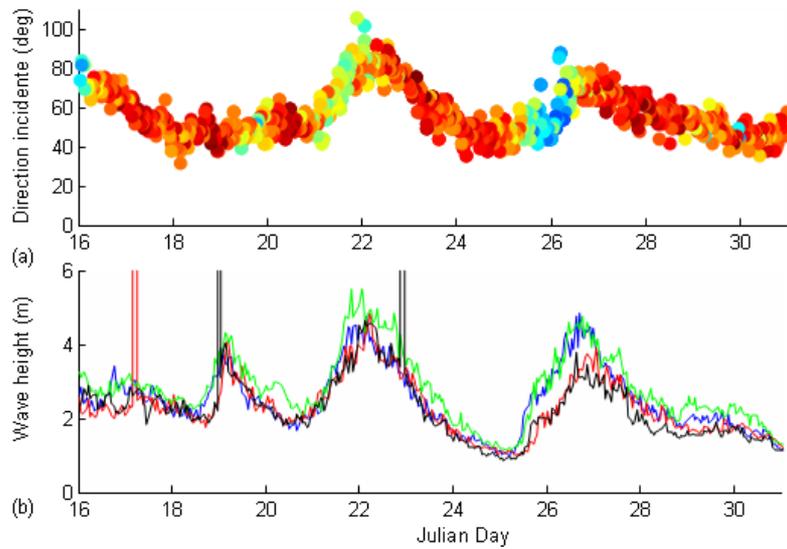


Fig. 1: (a) Direction incidente du bruit microsismique ambiant [0.1-0.2 Hz] mesuré sur quinze jours sur la faille de San Andreas et (b) corrélation avec la hauteur des vagues observée en quatre endroits différents sur la côte californienne.

2.1- Imagerie sismique locale via les ondes de surface.

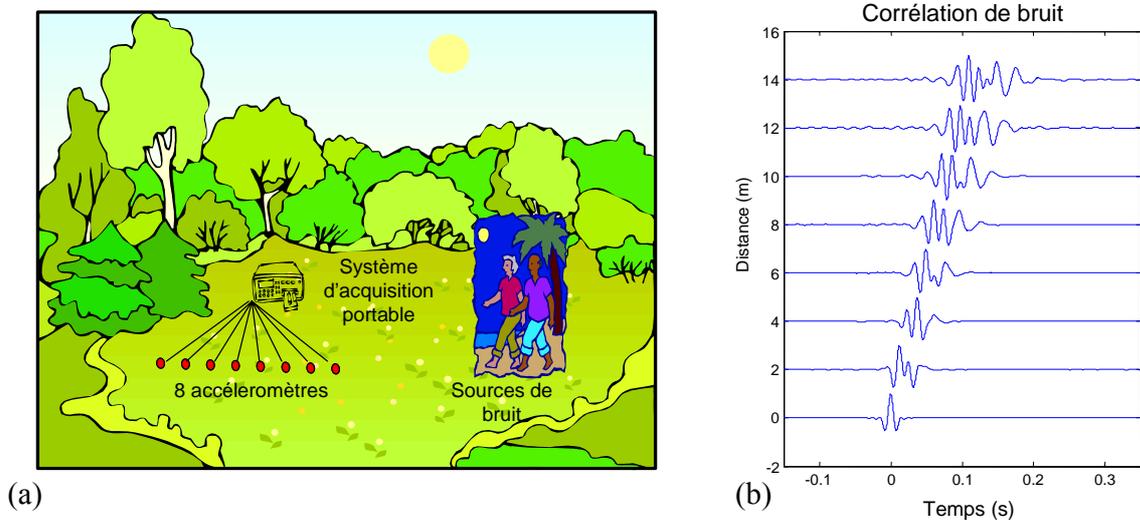


Fig. 2 : Première expérience de tomographie sismique effectuée à l'échelle du mètre sur la pelouse du LGIT. (a) 8 géophones ont été alignés tous les deux mètres et 5 minutes de bruit sismique ont été enregistrés simultanément sur ces capteurs. (b) Résultat de la corrélation du bruit sismique dans la bande 10-100 Hz (en abscisse) en fonction de la distance entre capteurs (en ordonnée). Les deux premiers modes de Rayleigh se dessinent clairement.

En profitant des réseaux de géophones du LGIT, nous cherchons à développer un sondeur sismique capable d'obtenir en temps réel le profil de vitesse des ondes transverses (ondes S) dans le sol sur une profondeur allant du mètre à quelques dizaines de mètres. A cette échelle, l'idée est de créer nos propres sources de bruit (bruit de pas autour du réseau) et d'utiliser les corrélations pour retrouver les fonctions de Green inter-

éléments après quelques minutes de « bruit » seulement. Ainsi, une première expérience a été faite en octobre 2005 sur la pelouse du LGIT avec 8 géophones et cinq minutes de bruit ambiant (Fig. 2a). Un rapport signal à bruit de 35dB a été obtenu par corrélation entre capteurs, corrélation qui met clairement en évidence les deux premiers modes de l'onde de Rayleigh (Fig. 2b).

L'aspect remarquable de cette section sismique locale est d'avoir été obtenue en l'espace de quelques minutes seulement, la corrélation inter-capteurs faisant office à la fois de synchronisation temporelle et de moyenne d'ensemble. La même expérience en sismique active aurait nécessité beaucoup plus de temps car un grand nombre de sources sismiques (autant de coups de masse que de pas effectués sur la pelouse, *grosso modo*) parfaitement moyennées et synchronisées pour obtenir un rapport signal à bruit équivalent. Ainsi, l'utilisation de sources de bruit « contrôlées » et du processus de corrélations permet de simplifier considérablement l'obtention d'une section sismique et permet d'envisager une imagerie du sous-sol très efficace en temps réel.

Sur les premiers mètres, le sous-sol est très sensible à l'humidité des différentes couches qui le constituent. Ainsi, le deuxième mode de Rayleigh (plus rapide) observé sur la Fig. 2b suggère la présence d'une couche humide à quelques mètres sous la surface. La répétition de ces expériences de sismique passive avant et après un événement pluvieux nous permettra de suivre en temps réel l'humidité d'un sol sur ses quelques premiers mètres.

Ces travaux de recherche sur l'imagerie sismique à petite échelle sont l'objet d'une large collaboration avec les équipes du LGIT impliqués dans l'étude du risque sismique [Gouedard et al, 2008a; Gouedard et al, 2008a]. Ainsi, les résultats issus des corrélations de bruit sont systématiquement comparés aux autres méthodes de traitement d'antenne développés dans le cadre général du Earthquake Engineering [Gouedard et al, 2008c]. A noter enfin que nos travaux sont co-financés par la compagnie pétrolière Shell dans le cadre d'un contrat (280,000 euros sur 2008-2011) et d'une thèse que je co-dirige avec Michel Campillo au LGIT (thèse de Bérénice Froment).

2.2- Imagerie sismique du corps humain

A plus petite échelle, mesurer les propriétés élastiques des muscles *in vivo*, comme l'élasticité, permet d'effectuer un diagnostic ou un contrôle de l'activité musculaire. C'est le but de l'élastographie qui apporte une information fondamentale dans le traitement des maladies liées à la dégénérescence musculaire (myopathies). On distingue deux types d'élastographie :

(1) l'élastographie statique où la déformation du muscle est mesurée en réponse à une contrainte quasi-statique ;

(2) l'élastographie dynamique (ou impulsionnelle) qui consiste à mesurer la vitesse de propagation d'une onde de cisaillement à l'aide d'un capteur ultrasonore à partir d'un choc indolore appliqué à la surface de la peau. La vitesse de propagation de cette onde basse fréquence exprimée en kPa est directement liée à l'élasticité du milieu étudié.

Bien que plus fiable, l'élastographie impulsionnelle est aussi plus onéreuse car elle nécessite un dispositif ultrasonore capable d'imager en temps réel (plus de 1000 images/s) la propagation de l'onde de cisaillement dans le muscle.

Le but de ce travail est de démontrer que l'élasticité des muscles peut aussi être mesurée à bien moindre coût (chiffré en millier d'euros plutôt qu'en million d'euros) par inter-corrélation du bruit « sismique » ambiant enregistré sur un réseau d'accéléromètres miniatures disposés sur le muscle en contraction (Fig. 3). Comme dans le cas de l'imagerie sismique passive de la Terre, cette technique d'élastographie passive bénéficie de la forte densité de chemins croisés entre couples de capteurs pour obtenir une mesure d'élasticité moyenne potentiellement aussi précise que les techniques d'élastographie classiques.

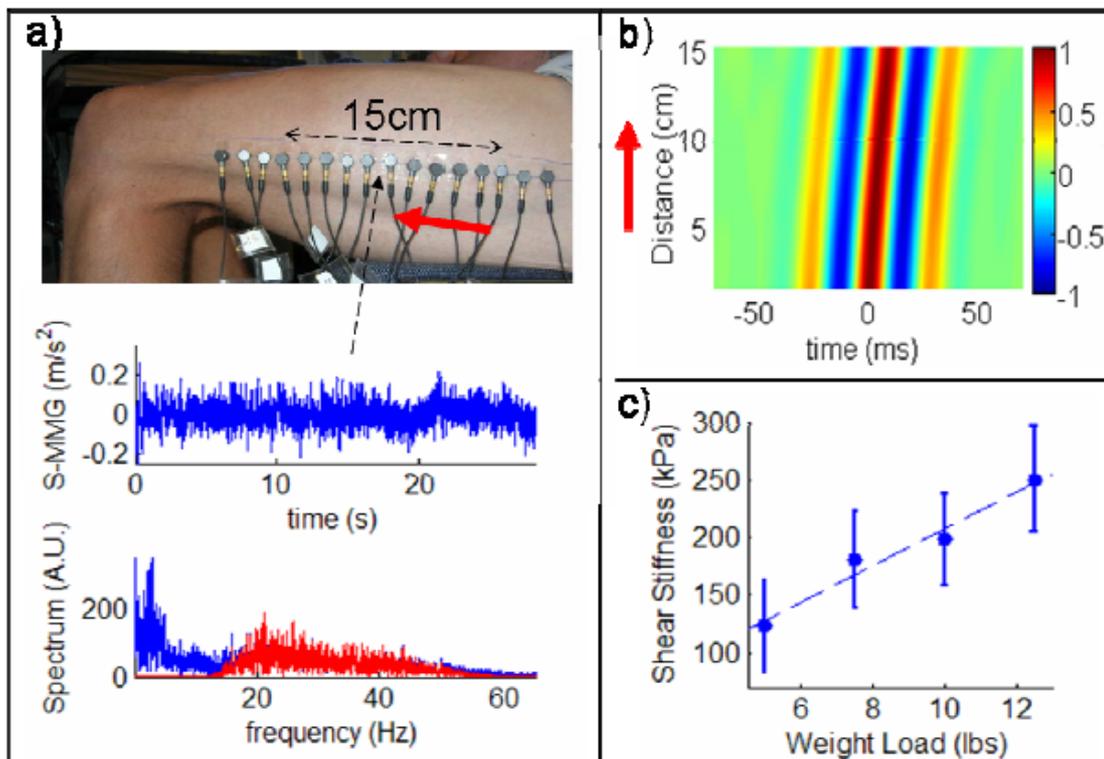


Fig. 3 : (a) Configuration expérimentale permettant l'enregistrement du bruit de vibration du muscle de la cuisse en tension isométrique à l'aide d'un réseau linéaire d'accéléromètres. (b) Onde transverse cohérente obtenue sur le réseau après corrélation inter-capteurs des signaux enregistrés dans la bande [15 Hz – 55 Hz] (voir Fig. 3a en rouge). (c) Variations de l'élasticité moyenne transverse des fibres musculaires en fonction de l'intensité de la contraction isométrique. Les barres d'erreur indiquent la déviation standard [Sabra et al, 2007].

Dans le cas de l'élastographie passive, les vibrations enregistrées à la surface du muscle sont appelées mécano-myogramme (MMG) en analogie avec les électro-myogrammes obtenus à partir de l'activité électrique du muscle [Orizio, 1993]. A notre connaissance, les MMG n'ont encore jamais été utilisés pour des mesures d'élastographie passive via des corrélations inter-capteur.

Quand le muscle est soumis à une contraction isométrique contrôlée par un poids (de l'ordre de 5 kg), l'activité musculaire provoque une augmentation significative des MMG et les corrélations sur des durées de 30s mettent clairement en évidence une onde de cisaillement cohérente se propageant le long du réseau (Fig. 3b). La vitesse de phase V de cette onde est directement reliée à l'élasticité du muscle $\mu = \rho V^2$ où ρ est la masse volumique musculaire ($\rho=1100 \text{ kg/m}^3$). La variation de l'élasticité du muscle en fonction de la contrainte isométrique (poids variant de 2,5 à 6 kilogrammes, Fig. 3c) est conforme à celle obtenue dans la littérature [Genisson et al, 2005].

Mesurer de façon passive l'élasticité d'un muscle en contraction est une première mondiale [Sabra et al, 2007]. Fort de ces premiers succès expérimentaux, notre objectif est maintenant d'effectuer des expériences comparatives sur des muscles in vivo en élastographie active et passive. Par ailleurs, le cœur étant une source très intense d'ondes de cisaillement, je souhaite profiter maintenant de cette source « sismique » pour développer une technique d'imagerie passive du corps humain (orientée principalement vers la détection précoce de tumeur cancéreuse du sein) via un ensemble d'accéléromètres disposés sur le thorax (Fig. 4).

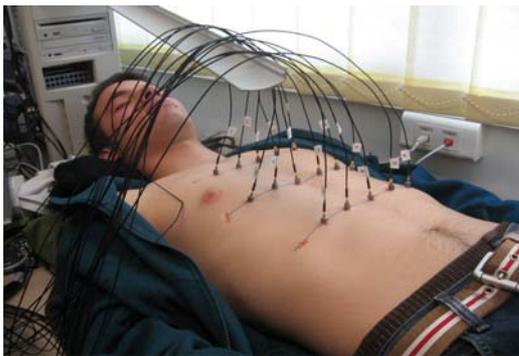


Fig. 4 : Imagerie sismique du corps humain ou « comment mesurer l'élasticité des tissus par le bruit ambiant du corps humain ? ». Cette configuration expérimentale met en jeu 16 accéléromètres miniatures placés sur le thorax du patient.

2.3- Imagerie passive et variation temporelle : importance des ondes diffuses.

La croûte terrestre est un milieu complexe dynamique, siège de nombreux processus physiques et chimiques localisés en profondeur et donc difficiles à appréhender car hors de portée de l'observation directe. En particulier, l'activité sismique d'une faille active est fortement liée au contexte tectonique de la région par le biais de chargement et déchargement de contraintes. Observer et quantifier les variations de contraintes avant, pendant et après un tremblement de terre est une clé pour la compréhension des mécanismes du séisme, mais aussi pour l'évaluation de l'aléa sismique et même d'un éventuel travail de prévision. Il existe quelques techniques pour mesurer les variations temporelles de contraintes dans la croûte (les tiltmeters, par exemple) mais les profondeurs atteintes sont limitées par celles des forages, et la précision des instruments ne permet pas toujours une estimation satisfaisante des variations temporelles. Les ondes sismiques, qui sondent les caractéristiques mécaniques du sous-sol sur de grandes

profondeurs, sont un candidat incontournable pour quantifier ces variations. On peut citer par exemples les techniques exploitant le splitting des ondes S, ou encore l'analyse de doublets sismiques (voir par exemple le travail pionnier de G. Poupinet au LGIT [Poupinet et al, 2004]). Cependant, ces techniques ont une résolution insuffisante, ou bien sont limitées par l'impossibilité de disposer de sources sismiques parfaitement reproductibles (même localisation, même mécanisme source).

Comparer des ondes sismiques pour mettre en évidence de petites variations dans le milieu, cela impose de disposer de sources sismiques absolument reproductibles (position fixe et forme d'onde émise inchangée). Cela a constitué un verrou expérimental considérable pendant de nombreuses années. En particulier, les tremblements de Terre ne sont que rarement reproductibles (doublets et multiplets) et leur degré de similitude est difficile à évaluer en pratique. Récemment, nous avons proposé au LGIT une technique exploitant les enregistrements permanents de bruit de fond sismique pour reconstruire la réponse impulsionnelle du sous-sol entre deux capteurs. Cette technique est basée sur la corrélation temporelle de signaux sismiques, elle est donc purement passive. Elle a permis d'imager le sous-sol en Californie [Shapiro et al, 2005], en Europe [Stehly et al, 2009], et est maintenant exploitée par de nombreuses équipes partout autour du monde [Lin et al, 2007; Kang and Shin, 2006 ; Pedersen and Kruger, 2007].

Une qualité centrale de cette technique de corrélation de bruit de fond est sa grande robustesse. Ainsi, Stehly *et al* (2006) et Brenguier *et al* (2007) ont montré que les corrélations sont stables en quelques jours. Il est donc possible de répéter ce traitement régulièrement comme si nous disposions de sources sismiques reproductibles dans le temps, ce qui permet de produire une image dynamique du milieu géophysique. Le travail de Brenguier et al porte sur un édifice volcanique (la Réunion). Ils ont montré que son évolution pouvait être étudiée et quantifiée en corrélant le bruit de fond sismique. Les variations de vitesse de groupe des ondes de Rayleigh ont été observées systématiquement juste avant les éruptions volcaniques, sur une période de 3 ans. Les variations observées à la Réunion sont interprétées comme liées à l'injection de fluide sous l'édifice volcanique. La question de l'application de cette technique aux tremblements de Terre est maintenant ouverte. Cependant, cette application comporte deux verrous principaux. D'abord, les variations de la croûte terrestre autour d'une faille active sont probablement plus faibles que sur un volcan, et potentiellement masquées par d'autres variations parasites (niveau de la nappe phréatique, thermo-élasticité...). D'autre part, les variations temporelles mesurées par corrélation de bruit s'avèrent dépendantes de la distribution spatiale des sources de bruit sismique. Ainsi, comme indiqué sur la Fig. 1, quand une tempête se déplace dans l'océan, le bruit sismique mesuré à terre provient principalement de cette source et les mesures de temps de trajet inter-stations sont sensiblement modifiées par le déplacement de la tempête. Comment alors savoir si ces modifications de temps de propagation entre chaque couple de stations est du à une modification du milieu et non pas à un biais lié à la distribution non-stationnaire des sources de bruit sismique ?

L'état des connaissances actuelles permet de proposer des axes de recherches qui sont de bons candidats pour lever ces deux verrous. La plupart des analyses du bruit de

fond sismique par corrélation temporelle exploitent l'onde directe reconstruite entre les stations. En l'occurrence, c'est l'information de dispersion de la l'onde de Rayleigh qui est déduite, et qui permet de remonter aux propriétés élastiques du sous-sol. Cependant, comme cela a été montré par de nombreuses études théoriques [Roux et al, 2005 ; Snieder, 2004, Weaver and Lobkis, 2001], la corrélation de bruit de fond contient bien plus d'informations (de signal) que l'onde de surface. En particulier, les arrivées tardives, issues de réflexions des ondes sur les hétérogénéités de la croûte, et qui constituent la coda sismique, peuvent être exploitées.

Lorsqu'une onde (élastique, acoustique, optique...) se propage dans un matériau hétérogène (comme la croûte terrestre pour les ondes sismiques), son trajet peut être fortement modifié. Les ondes sont parfois réfléchies plusieurs fois entre la source et le capteur avant d'être mesurées, leur trajet dans le milieu en est donc proportionnellement allongé. Parce qu'elles accumulent de petites variations de phase (temps de parcours) le long de leur propagation, les ondes diffuses de la coda sont extrêmement sensibles aux variations infimes du milieu. En particulier, elles sont beaucoup plus sensibles que les ondes directes.

Nous nous sommes donc intéressés aux variations temporelles mesurées dans la coda des ondes élastiques reconstruites à partir de corrélation de bruit ambiant. En particulier, nous avons étudié à l'échelle du laboratoire la sensibilité de ces variations temporelles à un changement de la distribution spatiale des sources de bruit [Hadziioannou et al, 2009] (Fig. 5).

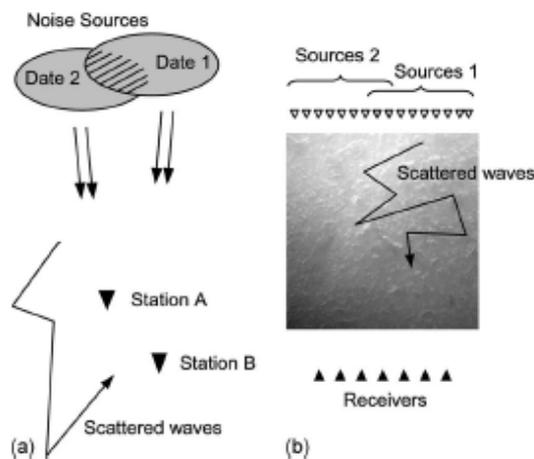


Fig. 5 : Sensibilité de la coda des ondes élastiques aux variations spatiales des sources de bruit : démonstration à l'échelle ultrasonore. Un gel cubique de taille ~10cm (à droite) est placé de part et d'autre de deux réseaux de transducteurs piézo-électriques au MHz (longueur d'onde ~mm). La présence de bulles d'air dans le gel induit une propagation d'ondes en régime de diffusion multiple. L'expérience consiste à faire évoluer la température du gel (et donc à modifier la vitesse de propagation des ondes) tout en changeant la position des sources acoustiques.

Les résultats montrent en particulier que même quand les sources de bruit ne permettent pas de reconstruire correctement la fonction de Green entre deux récepteurs, les variations temporelles obtenues sur la partie diffuse des corrélations de bruit sont bien reconstruites (Fig. 6).

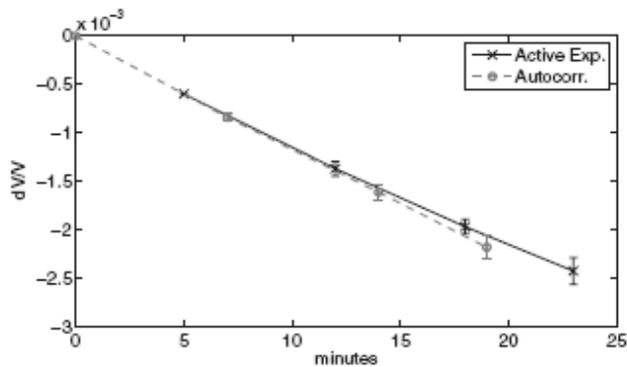


Fig. 6 : Variations relatives de vitesse des ondes acoustiques dV/V mesurées au cours du temps dans le gel par corrélation de bruit (ligne pointillée) et par des mesures interférométriques classiques (DWS, courbe en trait plein).

3- Acoustique sous-marine

Lors de mon séjour au Scripps Institution of Oceanography, j'ai passé un total de plus de trois mois en mer, ce qui m'a permis d'acquérir une grande expertise dans le domaine de l'expérimentation en acoustique sous-marine.

Bien entendu, la recherche en acoustique sous-marine en France ne dispose pas des moyens quasi-illimités dont disposent les meilleurs laboratoires américains dans ce domaine. Malgré tout, des collaborations sont possibles notamment avec le Scripps Institute of Oceanography à San Diego ou le NATO Saclant Center en Italie.

Une fois encore, la piste qui semble la plus intéressante est de développer des études à petites échelles en amont de projets à grandes échelles. La petite échelle est celle d'une cuve de 1 m^3 et des fréquences autour du MHz, mais aussi celle d'un canal de 10 m avec des fréquences de l'ordre de 100 kHz. La grande échelle est celle de l'océan. Les campagnes en mer coûtant très cher, rien n'est fait sans une préparation au préalable à base de simulations numériques. L'idée est d'ajouter à ces études numériques des résultats expérimentaux à petites échelles en profitant de la facilité d'emploi des réseaux de transducteurs ultrasonores en cuve.

Durant mon séjour à San Diego, j'ai créé et développé une plateforme ultrasonore en cuve destinée à l'étude de la propagation acoustique dans les guides d'onde sous-marins. Le même outil est maintenant en place à Grenoble dans l'Equipe d'Acoustique Expérimentale du LGIT. Par ailleurs, la Chaire d'Excellence Junior 2005 m'a aussi permis de munir cet équipement d'une électronique d'acquisition multi-voies permettant d'enregistrer presque en temps réel la matrice de transfert d'un guide d'onde entre 64 émetteurs et 64 récepteurs au MHz (Fig. 7).

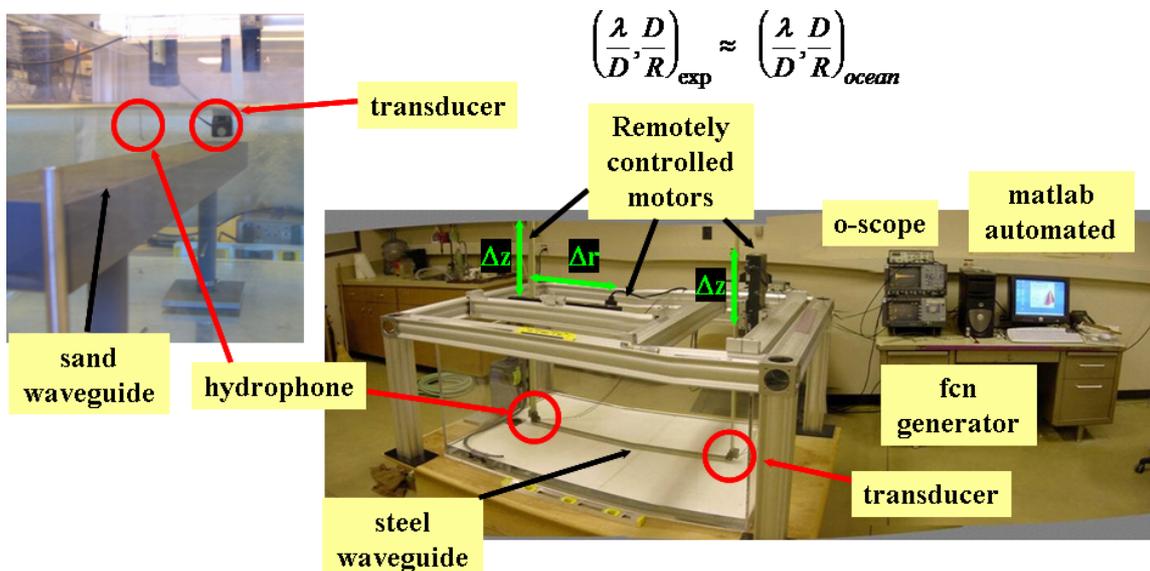


Fig. 7 : Dispositif expérimental à l'échelle ultrasonore permettant de reproduire la physique d'un guide d'onde océanique complexe (à gauche). Les rapports d'échelle entre la longueur d'onde λ , la distance de propagation R et la profondeur du guide d'onde D respectent les conditions observées en mer.

En février 2007, le Marine Physical Lab. de San Diego a bénéficié d'un financement de la Defense University Research Instrumentation Program (DURIP) à hauteur de \$572,000. Du point de vue américain, cet argent était destiné initialement à financer mon retour à San Diego après mes deux années sabbatiques à Grenoble (2005-2007). Ayant personnellement choisi de continuer l'aventure à Grenoble (et donc de démissionner de mon poste de chercheur à UCSD en juillet 2007), nous avons décidé d'acheter à San Diego une électronique d'acquisition multi-voies plus complète et plus performante (128 voies au lieu de 64 et une capacité mémoire accrue) que celle présente au LGIT et d'installer à la tête du laboratoire ultrasonore du MPL un de mes anciens doctorants américains devenu Project Scientist.

Dans la négociation, je fais bénéficier le MPL à San Diego de mon expertise dans ce type d'électronique multi-voies en assumant la direction scientifique de ce nouvel équipement et en effectuant quatre allers-retours San Diego-Grenoble par an sur la période 2008-2010. De mon côté, en dépit des contraintes personnelles liées à un tel programme, j'y vois la possibilité (1) de garder un lien fort avec le MPL et l'expertise acoustique sous-marine présente à San Diego malgré ma démission de UCSD et (2) de me retrouver à la tête de deux mini-laboratoires possédant chacun la même électronique d'acquisition multi-voies aux performances jusqu'ici inégalées dans le monde de l'acoustique ultrasonore. Le LGIT à Grenoble et le MPL à San Diego travaillant sur des problématiques très différentes (géophysique pour le premier et acoustique sous-marine pour le second), je ne crains pas la confusion des genres et j'entends au contraire progresser plus vite sur ces deux thèmes en profitant des compétences présentes dans chaque laboratoire.

3.1- Les environnements portuaires : un nouveau challenge en acoustique sous-marine.

Des évènements récents ont montré à travers le monde, l'importance du risque terroriste. Le trafic maritime constitue 80 % du trafic commercial mondial. Ce secteur est donc a priori fortement concerné. Le risque peut toucher aussi bien les infrastructures ou les navires militaires que les bâtiments civils, de commerces ou de passagers. Celui-ci est d'autant plus important qu'un navire est au mouillage, à l'intérieur d'une zone portuaire ou en zone abri. Il est donc primordial d'assurer une surveillance du plan d'eau autour des bâtiments pouvant être des cibles, par des moyens de détection radar, optroniques ou autres et d'assurer une surveillance de la sub-surface pour détecter des intrus tels que des plongeurs pouvant porter des charges explosives ou des véhicules autonomes présentant un danger potentiel.

Différents moyens sont proposés pour la surveillance sous-marine, que ce soit par des capteurs acoustiques actifs ou des capteurs passifs, acoustiques ou magnétiques. Les contraintes d'une zone portuaire sont malheureusement nombreuses, d'une part du fait du trafic important générant un bruit acoustique élevé, et d'autre part à cause des nombreuses sources magnétiques, limitant la possibilité de détecter les faibles signatures magnétiques des plongeurs. Les zones portuaires se caractérisent par de faibles hauteurs d'eau qui se traduisent par des multi-trajets, ayant pour conséquence de renforcer l'impact de la réverbération de surface. La faible hauteur d'eau a également pour conséquence de rendre la colonne d'eau très sensible aux variations de température et donc de provoquer des variations très rapides de la bathy-célérimétrie qui se traduit, pour des systèmes actifs, par des performances très variables en portée et en détection.

Il est donc important de mener des recherches mettant en œuvre d'autres techniques pour tenter de réduire l'effet des contraintes précisées ci-dessus sur les performances (1) des systèmes d'imagerie des fluctuations du guide d'onde au cours du temps (vagues, profondeur, vitesse du son) et (2) des algorithmes de détection et de localisation de cibles dans les guides d'onde.

Notre axe de recherche est de combiner deux avancées récentes en acoustique sous marine :

- le concept de double formation de voies entre un réseau émetteur et un réseau récepteur, qui permet d'isoler et de sélectionner à partir du champ de pression chaque rayon acoustique se propageant dans le guide d'onde [Roux et al, 2008].
- l'utilisation des noyaux de sensibilité en tomographie acoustique qui permettent d'améliorer les techniques d'inversion en tenant compte de la zone de Fresnel du champ acoustique à fréquence finie [Iturbe et al, 2009a].

A noter qu'une ANR blanche a été soumise sur ce sujet en collaboration avec le GIPSA-Lab en novembre 2009 et qu'un Partner University Fund (PUF) a été déposé avec le MPL, San Diego pour favoriser les déplacements entre chercheurs et étudiants entre nos labos sur la période 2010-2012.

3.2- Traitement d'antennes en guide d'onde océanique.

Suite aux premiers articles théoriques démontrant la possibilité de cartographier les changements de température dans l'océan par inversion tomographique acoustique [Munk et al, 1995], les nombreux travaux expérimentaux qui ont tenté de confirmer ces résultats se sont tous soldés par des échecs relatifs, l'océan se révélant un milieu complexe beaucoup plus chaotique et imprévisible que prévu pour les ondes acoustiques. En fait, c'est surtout l'impossibilité pratique de déployer un nombre suffisants de sources/récepteurs dans l'océan profond qui ne permet pas de conclure quant aux performances réelles de la tomographie acoustique océanique.

L'étude de la propagation acoustique dans les guides d'onde a récemment pris un intérêt particulier en acoustique sous-marine. En effet, l'acquisition de la fonction de transfert d'un guide d'onde a été effectuée en mer en 2003, 2004, 2005 et 2006 par le Marine Physical Laboratory (MPL) à San Diego entre un réseau de sources et un réseau d'hydrophones couvrant totalement la hauteur d'eau [Roux et al, 2004b]. Durant ces expériences auxquelles j'ai systématiquement participé, 29 transducteurs sources et 32 hydrophones ont été placés entre 1 et 5 km de distance dans un chenal acoustique de 115 m de profondeur (Fig. 8). L'acquisition de la fonction de Green entre chaque couple émetteur-récepteur a été réalisée toutes les 20 s pendant plusieurs heures dans la bande de fréquence 3-4 kHz.

L'ambition de ces expériences était, entre autres, de définir les limites acoustiques de l'inversion tomographique sur une réplique à moyenne échelle de l'océan profond quand la fonction de transfert spatio-temporelle du guide d'onde acoustique est bien échantillonnée.

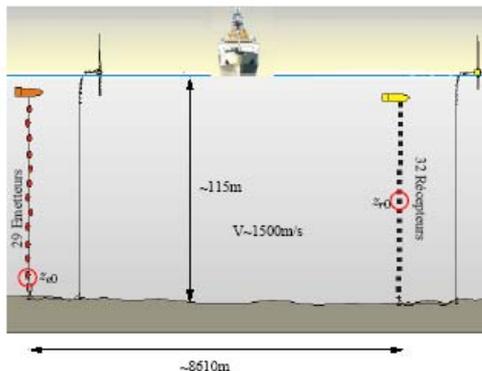


Fig. 8: Configuration expérimentale des expériences effectuées en mer avec le MPL de 2003 à 2006 entre deux réseaux d'émetteurs / récepteurs dans un guide d'onde océanique.

A la suite de ces expériences, nous avons développé un nouveau type d'analyse tomographique basé sur la séparation angulaire d'un rayon acoustique. L'enregistrement de la matrice de transfert du guide d'onde étant faite sur deux réseaux verticaux de sources et de récepteurs, une transformée de Fourier spatiale sur chacun de ces réseaux permet de passer de la base canonique (une source – un récepteur) à la base angulaire des nombres d'onde (un angle d'émission – un angle de réception). Cette transformation (qui s'apparente à une transformée de Fourier spatiale) est effectuée directement sur les

données et dans le domaine temporel via un algorithme de double formation de voies [Roux et al, 2008].

L'intérêt de cette double transformation est multiple. En particulier, elle permet d'identifier et de séparer chaque rayon acoustique entre un couple émetteur-récepteur par leur angle d'émission/réception même si ces échos se superposent au récepteur (Fig. 9). En séparant chacun des échos acoustiques dans l'espace réciproque des angles, on peut utiliser chaque rayon entre chaque couple émetteur-récepteur pour obtenir une image tomographique haute résolution du guide d'onde océanique.

L'analyse des jeux de données en mer et de données issues de simulations numériques via la séparation angulaire – appelée Double Beamforming (DBF) en anglais - de rayons acoustiques donnent lieu à d'importantes avancées dans le domaine de la tomographie acoustique en eau peu profonde [Iturbe et al, 2009b]. En effet, ces données constituent l'équivalent acoustique d'un scanner du guide d'onde océanique. La qualité de l'information recueillie permet d'envisager une très haute résolution dans l'algorithme d'inversion utilisé pour accéder, par exemple, à l'évolution de la carte de température en temps réel dans le guide d'onde. De premières estimations ont établi à $20\lambda \times \lambda$ (en distance et profondeur, λ étant la longueur d'onde acoustique) la taille de la cellule de résolution dans le guide. Cette résolution hyperfine fournit des informations nouvelles sur l'interaction temporelle des structures spatiales propres à l'océan: ondes internes, structures tourbillonnaires macroscopiques, relation entre convection et gradient de densité, etc.

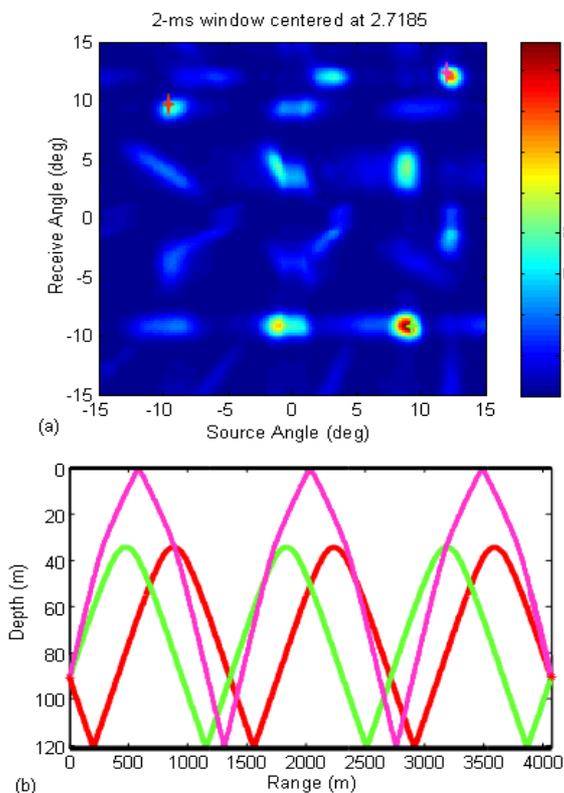


Fig. 9 : (a) Séparation angulaire de trois rayons acoustiques entre un couple émetteur-récepteur par double formation de voie pour une fenêtre de temps donné (données expérimentales). Chaque croix de couleur sur la Fig. 8(a) correspond au rayon représenté sur la Fig. 8(b). Les lobes secondaires observés sur la Fig. 8(a) sont dus au sous-échantillonnage spatial des réseaux émetteurs/récepteurs (lobes de réseaux) et sont parfaitement prévus par les lois de la diffraction. (b) Les trois échos se superposant dans le domaine temporel, seule la séparation angulaire permet leur utilisation dans une inversion tomographique.

3.3- Tomographie océanique dans les guides d'ondes ultrasonores.

Travel-time tomography in the ocean, based on ray theory, is described in detail in [Munk et al, 1995; see also <http://npal.ucsd.edu/thermometry/index.htm>]. It explains that solving the inverse problem for sound speed variations could be managed, for small variations, through a linearized approximation around an initial background state of the ocean. The sound speed $c(\underline{x})$, at spatial coordinate \underline{x} , is defined by: $c(\underline{x}) = c_0(\underline{x}) + \delta c(\underline{x})$ where c_0 is the reference environment sound speed and $\delta c(\underline{x})$ are the small perturbations that we estimate. Linearizing the relationship between the sound speed variation $\delta c(\underline{x})$ and the arrival time variation $\delta \tau_n$ of a ray n leads to the well-known equation:

$$\delta \tau_n = - \int_{\Gamma_n} \frac{\delta c(\underline{x})}{c_0(\underline{x})^2} ds, \quad n = 1, 2, \dots, N$$

where the integration Γ_n is along the unperturbed ray path. Allowing noise \underline{b} on the travel time measurements $\underline{\delta \tau} = [\delta \tau_n, n=1..N]$ the formulation of the linearized problem becomes:

$$\underline{\delta \tau} = \mathbf{G} \underline{m} + \underline{b}$$

where \mathbf{G} is a known matrix calculated for the background state. Many algorithms exist to obtain an estimate of \underline{m} . For the frequent mixed-determined case, least square solutions are usually derived. Well described procedures how to solve these problems are given in [Tarantola, 1984] taking into account errors in the data set and a priori information on the model.

The key point is then to build a matrix \mathbf{G} which describes as well as possible the propagation in the medium. Indeed this model will impact the resolution and accuracy of the obtained result. Note that for detection-localization of a target in shallow water environment performed using an acoustic impedance tomography a linearized formulation of the problem is also possible between acoustic impedance variation and measure of the amplitude variation.

Classical sound speed tomography builds \mathbf{G} using ray theory. The main drawback of this model is that the information about frequency of the recorded time series is not used in the travel-time tomography machinery based on ray theory (for a review see [Virieux and Lambaré, 2007]). Ad-hoc procedures for palliating this lack of information have been built up [Husen and Kissling, 2001] with the so-called fat ray concept based on ad-hoc reconstruction argumentation. In recent years, this finite frequency influence has been systematically investigated on the different observables (time, polarisation...) by different groups of researchers [Dahlen et al, 2000; Montelli et al, 2004; Nolet et al, 2005] and has given the confidence that higher resolution images may come from this better description of the physics of wave propagation.

Based on single-scattering effects, sensitivity kernels which link the acoustic observables to the variation in the medium (i.e. the travel time to sound speed velocity for the classical ocean acoustic tomography) have been introduced in geophysics and different computational techniques have been devised [Dahlen et al, 2000; Tromp et al,

2005, Tape et al, 2007]. Different authors [DeHoope and Van der Hilst, 2005] have questioned the differential techniques used for the construction of these sensitivity kernels with the spot light on the so-called Banana-Doughnut paradox: for travel-times, the sensitivity kernel is zero on the ray connecting the source and the receiver.

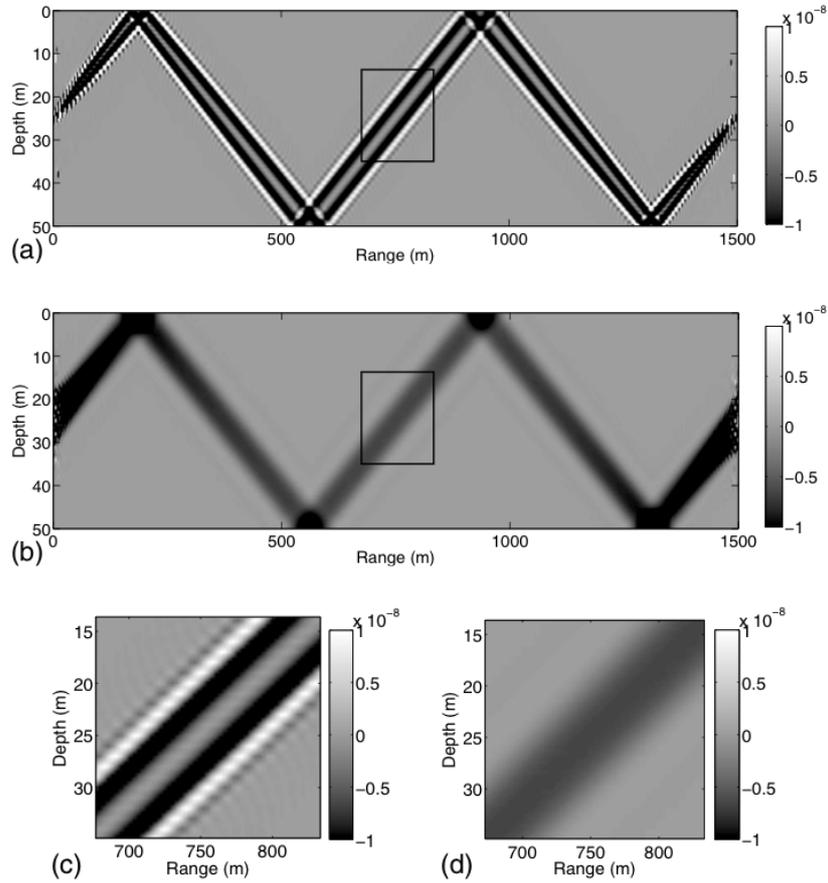


Fig. 10: TSK (s2.m-4) at 20 kHz central frequency with 30 kHz bandwidth. (a) point to point; (b) with DBF over $200\text{-}\lambda$ length arrays. (c) and (d) zoom on the central part of the ray, defined by the black square in (a) and (b).

On the other hand, considering arrays of sources and receivers is a classical approach in underwater acoustic. Wave propagation problems might lead to similar features as in geophysics and we would like to investigate the effects of the finite size of the source and source-receiver arrays in the underwater tomographic reconstruction. The concept of sensitivity kernels have been creeping recently in this field [Skarsoulis and Cornuelle, 2004] and quite exciting theoretical and experimental investigations have led to fruitful achievements with links with time-reversal theory, adjoint formulations [Tromp et al, 2005] and acoustic and seismic imaging [Tarantola, 1984]. Relations between Travel-time Sensitivity Kernel (TSK) reconstruction and diffraction theory in the context of shallow water underwater acoustics has been elaborated when the transfer function of the waveguide is recorded between source and receiver arrays [Iturbe et al, 2009a].

In the context of DBF, the TSK has been determined [Iturbe et al, 2009a] and is no more the usual point-to-point TSK but relies on all source-receiver time series: kernels have to be computed using the fact that the processed signal is no longer the recorded signal between a source and a receiver but a linear combination of time-delayed signals between all sources and receivers. An example of TSK, linked to measure of the travel time after DBF is presented in Fig. 10.

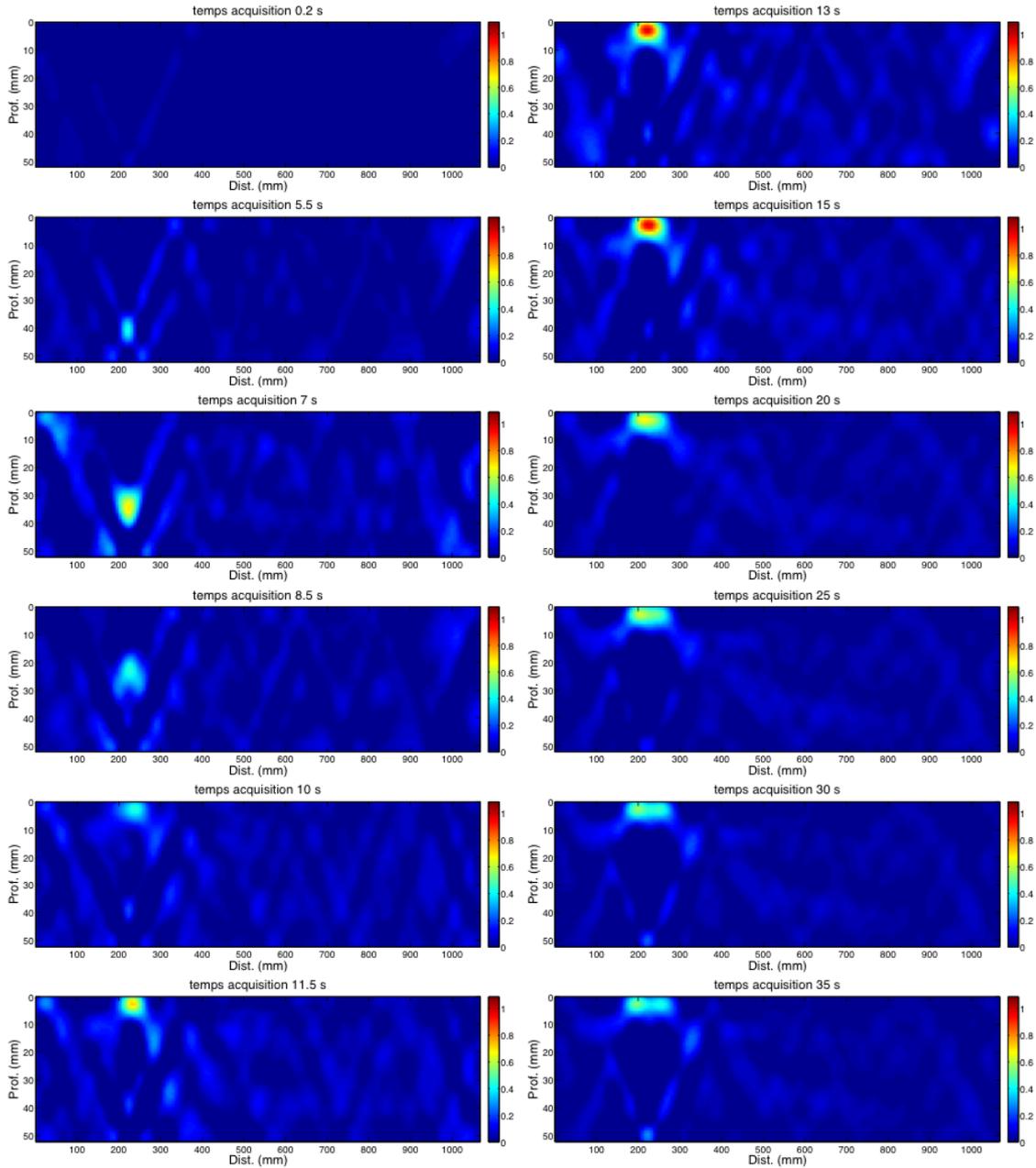


Fig. 11: Tomography results obtained in the ultrasonic tank where a heater has been placed on the bottom. During the 40s experiment, 400 images were obtained every 0.1 s. 12 of these images are shown here. We can clearly see the wave going from the waveguide bottom to the surface where it accumulates.

The first use of sensitivity kernel after double beamforming in inversion has just been realized by I. Iturbe during his PhD [Iturbe, 2010]. We proposed, and validated on real data, an inversion method using travel times and sensitivity kernels after double beamforming. Figure 11 shows results obtained in the ultrasonic tank of LGIT during which we performed the estimation, along the time, of sound speed variations due to a heating system located on the waveguide bottom. Using the tomography process, we can accurately image the warm water going from the bottom of the waveguide to the surface where it accumulates. These very encouraging results show the capability of double beamforming combined to sensitivity kernels to perform a high resolution (in space and time) tomography and create a strong motivation in the team to continue our work in this domain.

Besides, one may expect that additional information coming from amplitudes of the time series will provide better reconstruction leading to the concept of full-wave tomography where both amplitude and travel-times are used in the inversion algorithm. Moreover, as shown in seismology [Billette and Lambaré, 1998] under the name of stereo-tomography and more recently under the name of slope tomography, the launch and receive angles which might be considered as first-derivatives of arrival times also improves the velocity reconstruction. Because shallow water propagation has different geometry configuration, we would like to investigate the relevance and the applicability of using launch and receive angles to further improve our tomography results.

3.4- Détection de cible dans les guides d'ondes ultrasonores.

La plupart des travaux concernant la détection de cibles passives sont effectués en rétrodiffusion à l'aide d'une antenne à la fois émettrice et réceptrice. Les méthodes proposées dans ce cadre, comme par exemple la Décomposition de l'Opérateur de Retournement Temporel (DORT) [Prada and Fink, 1995], donnent une bonne détection à courte distance (<300 m) mais nécessitent de fortes puissances à l'émission et une connaissance précise de l'environnement pour une localisation satisfaisante. Ces deux dernières limitations en font une technique difficile à mettre en œuvre de façon permanente en environnement portuaire.

Nous avons donc cherché à développer une méthode de détection/localisation en transmission qui fournisse une détection en tout point du guide d'onde entre un réseau émetteur et un réseau récepteur distant d'un à plusieurs kilomètres formant ainsi une barrière acoustique de détection entre les deux réseaux. Même si le concept de barrière acoustique entre deux réseaux n'est pas nouveau, peu de travaux expérimentaux ont été réalisés dans cette configuration. Quelques études préliminaires envisagent d'utiliser le retournement temporel afin de détecter la cible en transmission [Song et al, 2003; Stevenson et al, 2007]. Cette méthode a été testée en pratique et s'avère, à l'heure actuelle, insuffisante dans le cas de cibles de petite taille. Le problème classique de la détection en transmission réside dans le fait que le réseau récepteur est le plus souvent « ébloui » par l'onde incidente émise par le réseau source au point de ne plus « distinguer » l'onde diffusée par la cible.

Pour réduire cette éblouissement, l'idée de mon travail fut (1) de décomposer l'onde incidente sur les multiples rayons acoustiques entre chaque source et chaque récepteur en profitant de la double formation de voies, puis (2) de quantifier l'effet d'ombre provoqué par la cible pour chacun des rayons pris individuellement afin de la détecter et de la localiser de façon optimale dans le guide d'onde.

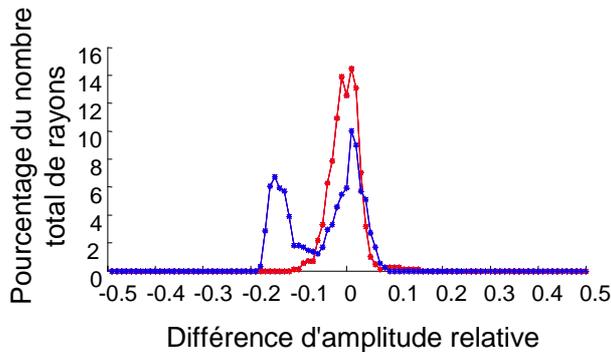


Fig.12 : Détection dans un guide d'onde ultrasonore par DBF. En bleu et rouge, expériences avec et sans cible.

L'ambition de notre travail est de montrer l'intérêt et la faisabilité d'un nouveau concept de barrière acoustique en zone portuaire pour détecter et localiser des intrus de faibles index de réflectivité, compris entre -15 dB et -30 dB dans un milieu sous fortes contraintes avec un taux de détection maximal pour une probabilité de fausse alarme très faible. La détection et la localisation d'une intrusion doivent bien évidemment se faire en temps réel.

A partir des données expérimentales obtenues à l'échelle ultrasonore, l'algorithme de DBF permet d'isoler et d'identifier la quasi-totalité des trajets multiples (ou rayons acoustiques) qui connectent chaque sous-antenne du réseau émetteur à chaque sous-antenne du réseau récepteur. Pour des réseaux sources-récepteurs de 64 éléments, l'amplitude de plus de 15000 rayons est ainsi mesurée dans le guide d'onde. Si une cible traverse la barrière acoustique constituée par les deux antennes, l'amplitude de certains rayons est affectée par l'effet d'ombre produit par la présence de la cible. L'histogramme des variations d'amplitude des rayons acoustiques mesurées en présence et en l'absence de cible permet alors de détecter la cible sans ambiguïté (Fig. 12).

Une fois la source détectée, il est alors possible de la localiser en projetant dans le guide d'onde les variations d'amplitude mesurée sur les trajets théoriques des rayons affectés. Ces trajets sont calculés à partir d'un algorithme de tracé de rayons nécessitant peu de connaissance sur le milieu de propagation. En superposant les variations d'amplitude dues à la cible sur chacun des rayons affectés, nous obtenons une carte de détection de la cible telle que celle présentée sur la Fig. 13 pour une cible immobile à partir de résultats expérimentaux à petites échelles.

Ce projet a reçu le financement de la Délégation Générale de l'Armement (DGA) à hauteur de 100,000 euros sur la période déc. 2007- déc. 2009.

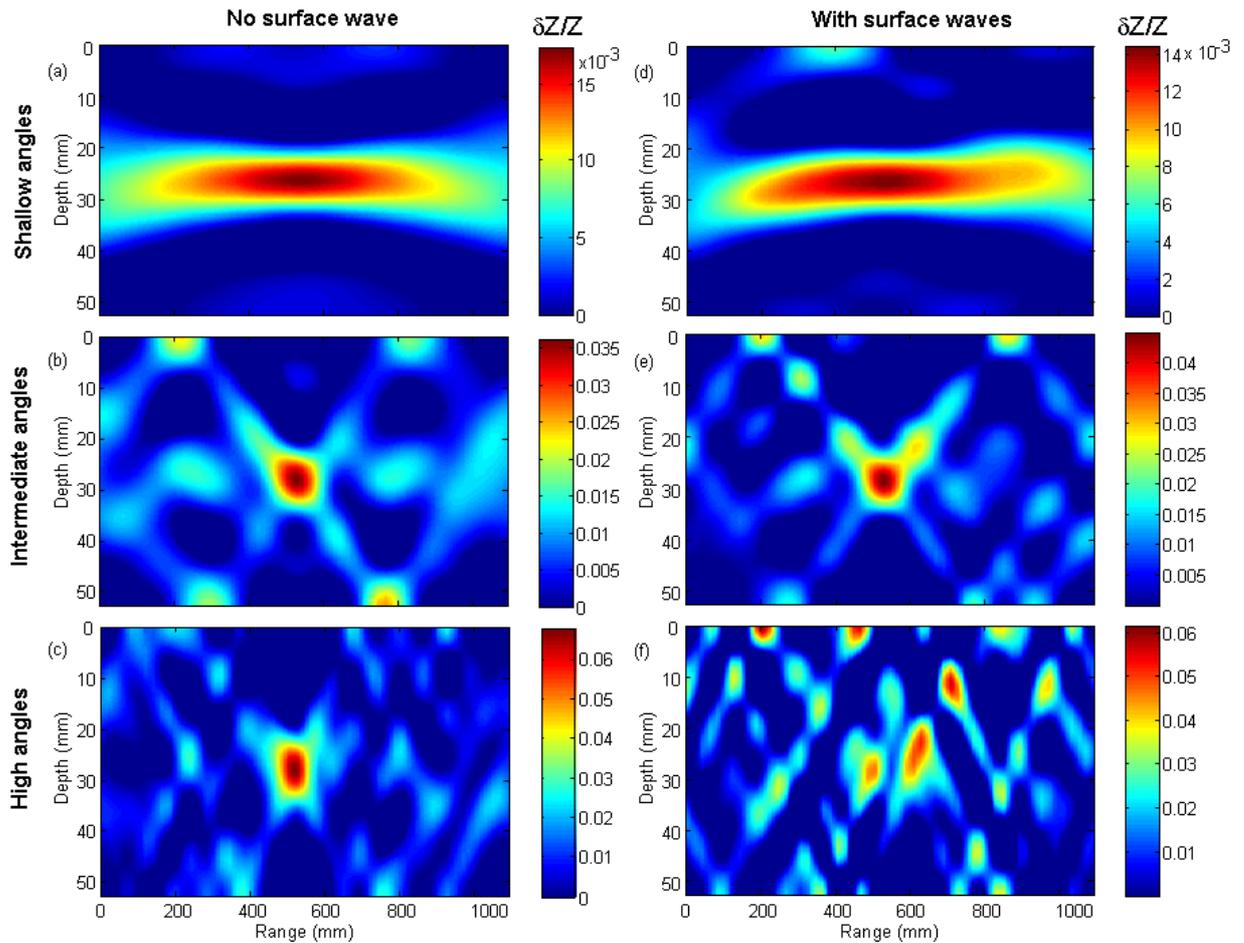


Fig. 13 : Résultats de détection de cible et inversion en $\delta Z/Z$ (impédance acoustique) dans un guide d'onde ultrasonore. (a), (b), (c) Pas de vague à l'interface eau-air et inversion utilisant les rayons avec des angles inférieurs à 3° , 7° and 12° , respectivement. (d), (e), (f) En présence de vagues à l'interface eau-air et inversion utilisant les rayons avec des angles inférieurs à 3° , 7° and 12° , respectivement [Marandet et al, 2010].

4- Annexe

Depuis mon retour au LGIT en juillet 2005, j'ai équipé l'Equipe d'Acoustique Expérimentale des outils nécessaires à l'étude des ondes acoustiques/élastiques sur des échelles allant du mm au km. Ainsi, nous travaillons dès maintenant avec deux systèmes d'acquisition complémentaires :

(1) une électronique d'acquisition haute fréquence composée de 64 voies indépendantes pouvant émettre et enregistrer en temps réel la fonction de transfert de milieux diffractants sur une bande passante allant de 20 kHz à 30 MHz.

(2) une électronique plus basse fréquence (1 Hz-100 kHz) possédant 32 voies synchronisées pour une fréquence d'échantillonnage de 500 kHz par voie.

Ces deux électroniques d'acquisition sont couplées à des réseaux émetteurs/récepteurs de plusieurs types :

- deux couples de réseaux émetteurs/récepteurs de 64 éléments piézo-électriques centrés respectivement à 1 MHz et 3 MHz qui couvrent la bande de fréquence [200 kHz – 5 MHz]. Par ailleurs, deux transducteurs mono-éléments et deux hydrophones large-bande viennent compléter notre dispositif ultrasonore.

- 32 puis bientôt 64 accéléromètres hautes fréquences possédant une très forte dynamique en réception (> 90dB) entre 1 Hz et 100 kHz.

- pour les expériences de terrain, le LGIT possède un grand nombre de géophones et de stations sismiques (0,1 Hz - 200 Hz) dont le réseau IHR (Imagerie Haute résolution) qui concentre un maximum de 270 capteurs sismiques à l'échelle du kilomètre.

A.3- Enseignement, formation et diffusion de la culture scientifique (2006-2009)

1- Encadrement

Post doc

- Margherita Corciuolo, juin 2009- présent, LGIT.
- Alexei Sukhovich, mars 2008 – décembre 2009, en post-doc à l'Université de Nice Sophia Antipolis.
- Eric Larose, mars 2006- octobre 2006, chargé de recherche CNRS depuis octobre 2006.

Etudiants en thèse (en cours)

- Benoit De Cacqueray (directeur de thèse), thèse débutée en nov. 2009, 1ère année de thèse, (UJF).
- Christian Marandet (directeur de thèse), thèse débutée en sept. 2008, 2ème année de thèse, (UJF).
- Bérénice froment (co-directeur de thèse 50%), thèse débutée en sept. 2008, 2ème année de thèse, (UJF).
- Estelle Cros (co-directeur de thèse 50%), thèse débutée en sept. 2008, 2ème année de thèse, (UJF).
- Thomas Gallot (co-directeur de thèse 33%), thèse débutée en sept. 2007, 3ème année de thèse, (UJF).
- Ali Mikael (co-directeur de thèse 33%), thèse débutée en sept. 2007, 3ème année de thèse, (UJF).

Etudiants en thèse (soutenue)

- Ion Iturbe (directeur de thèse), thèse soutenue le 12 janvier 2009 (INPG), en CDI dans l'industrie robotique (Espagne).
- Pierre Gouédard (directeur de thèse), thèse soutenue le 8 décembre 2008, (UJF), en post-doc au MIT (Boston, USA)

Etudiant en master 2 (stage longue durée)

- Estelle Cros, M2R UJF, mars à juin 2008.
- Romain Château, M2R UJF, mars à juin 2008.
- Christian Marandet, M2P UJF, mars à septembre 2008.
- Lamia Cheniki, M2P UJF, mars à septembre 2007.
- Saad Mezghache, M2P UJF, mars à septembre 2007.
- Issam Khadraoui, M2P UJF, mars à septembre 2006.
- Katrien Keirbrat, Erasmus UJF, mars à juin 2006.

Participation à des jurys de thèse ou habilitation à diriger les recherches

- Ion Iturbe (directeur de thèse), janvier 2010, INPG.
- Matthieu Landès (rapporteur), novembre 2009, IPG Paris.
- Elisabeth Canet (président du jury), novembre 2009, UJF.

- Pierre Gouédard (directeur de thèse), décembre 2008, UJF.
- Franck Philippe (rapporteur), novembre 2008, Paris 7.
- Lili Ganjehi, (rapporteur), février 2008, Paris 6.
- Francois Gerlotto (rapporteur de thèse d'habilitation), décembre 2007, Université de Montpellier 2.
- Jean-Luc Robert (rapporteur), juin 2007, Paris 6.
- Delphine Palaccio (rapporteur), novembre 2006, Paris 6.
- Cyril Kotenkoff (examineur), novembre 2006, UJF.
- Stéfan Catheline (rapporteur de thèse d'habilitation), avril 2006, Paris 7.

2- Enseignement

- janvier 2007-2010: 12h de cours au Master Pro d'Acoustique Ultrasonore, Université Joseph Fourier, sur le thème : « Techniques d'inversion ».
- octobre 2006 : 40 heures de cours/travaux dirigés à l'Université d'Istanbul (Turquie), niveau doctorat et post-doctorat, sur le thème : « Introduction to Underwater Acoustics ».

3- Organisation de conférences

- Co-organisateur du workshop « Acoustical Imaging of Complex Media: Applications in Medicine, Seismology and Oceanography », October 15th - 20th, 2007, Cargèse, France.

4- Intervention dans la presse audiovisuelle.

- participation à l'émission Thalassa sur Naples (Oct. 2009).
ftp://ftp-lgit.obs.ujf-grenoble.fr/pub/lgit/lgit/videos/thalassa_italie.mpeg

A.4- Transfert technologique, relations industrielles et valorisation (2006-2009)

SOURCE OF SUPPORT	PROJECT/PROPOSAL TITLE	MAN MONTHS	AMOUNT	PERIOD COVERED
ONR N00014-03-1-0478	Extracting Coherent Structure from High Frequency Ocean Noise	8.0	867 k\$	01/2003 01/2007
ONR 20050027	High Resolution Imaging of the Dynamic shallow Water Waveguide	3.0	1,064 k\$	10/2004 10/2007
DOE 20050906	Extracting Waveforms from Seismic Noise for Calibration of Aseismic Regions	4.1	395 k\$	01/2005 03/2007
Ministère de la Recherche	Plan Pluri-Formation « Spectroscopie Ultrasonore Multi-Echelles »	6	120 k€	01/2003 01/2007
INSU – mi lourd	Projet de recherche interdisciplinaire « Imagerie Acoustique Multi-échelles »	6	50 k€	09/2005 12/2006
Ministère de la Recherche (MSTP) – DSPT3	Installation du Laboratoire d’Acoustique Expérimental	6	40 k€	09/2005 12/2006
ANR – Chaire d’Excellence Junior	Projet de recherche interdisciplinaire « Imagerie Acoustique Multi-échelles »	18	250 k€	01/2006 01/2009
Shell Int. Exploration and Production B.V.	Study for interferometry of surface and body waves	1	15 k€	09/2006 09/2008
Direction Générale de l’Armement	Démonstration à petite échelle d’un nouveau concept de barriere acoustique	6	100 k€	12/2007 12/2009
Shell Int. Exploration and Production B.V.	Monitoring slight mechanical changes using seismic background noise	4.8	280 k€	07/2008 07/2012
Shell Int. Exploration and Production B.V.	Extraction and Imaging of coherent reflections from multiply scattered waves	0.5	10 k€	11/2008 12/2008
ANR Risk Nat’	Quantification de la dynamique et suivi spatio-temporelle du système hydrothermal de la Soufrière de Guadeloupe	3.6	560 k€	01/2009 01/2012
ANR Risk Nat’	Nouvelles perspectives sur le risque sismique associé à la subduction: transitoires, trémors, monitoring passif, tectonique et scénarios.	3.6	560 k€	01/2009 01/2012
Société Total	Imagerie et le monitoring passifs par corrélation de bruit de fond sismique : applications aux réservoirs pétroliers	4.8	173 k€	06/2009 06/2011

European Research Council Advanced Grant	Whisper : Towards continuous monitoring of the continuously changing earth	12	1.7 M€	6/2009 6/2014
ANR Blanc	Geobridge : rupture des géomatériaux cohésifs : liens entre les échelles	6	410 k€	10/2009 10/2012

A.5- Encadrement, animation et management de la recherche (2006-2009)

1- Management de la recherche

Responsable de l'ANR Chaire d'excellence Junior : Projet de recherche interdisciplinaire « Imagerie Acoustique Multi-échelles », 250 k€, de janvier 2006 à décembre 2008.

2- Responsabilité au sein du laboratoire

- membre nommé du Conseil de Direction du LGIT depuis janvier 2007.
- co-responsable (avec Michel Campillo) de l'Equipe Ondes et Structure au sein du LGIT (9 chercheurs, 4 ITA, 4 post-docs, 9 doctorants).

B- Objectifs

Mon projet de recherche pour les quatre prochaines années va bien évidemment suivre le fil conducteur de mon travail de recherche (voir paragraphes Géophysique et Acoustique sous-marine plus haut), à savoir le développement de travaux sur la propagation d'ondes en -milieux complexes via des approches multi-échelles.

Coté projet toujours, j'ai contribué à la soumission de trois nouveaux projets ANR en novembre 2009 :

- ANR jeune chercheur, portée par Barbara Nicolas (Gipsa-lab), « Tomographie Océaniques en zone peu profonde : nouvelles perspectives en Traitement du Signal », budget demandé 181 k€.
- ANR blanc, porté par Stéfan Catheline (LGIT), « Imagerie Ultrasonore Ultra-rapide pour la Physique », budget demandé 394 k€.
- ANR blanc, porté par François Gerlotto (IRD-Sète), « Construction et Application d'un Sonar Tridimensionnel pour l'Observation des Ressources aquatiques », budget demandé 969 k€.

Fort des synergies intra et inter-laboratoires nées de l'installation d'une équipe de physicien des ondes au LGIT, nous continuerons à nous placer à l'interface Acoustique-Physique-Géophysique pour donner à nos collègues des sciences de la terre un éclairage de physicien sur la propagation des ondes.

En particulier, je m'appuierai sur les deux plateformes expérimentales installées au LGIT. Pour faire court, je synthétiserai mes projets par un catalogue d'expériences prêtes à être menées au laboratoire dans les quatre prochaines années :

1- Sur la plateforme MHz:

-Tomographie acoustique et détection de cibles dans les guides d'onde sous-marins.

-Imagerie des ondes de cisaillement (ondes transverses) dans un volume ou sur une interface dynamique via l'élastographie impulsionnelle. Application à la géophysique des milieux élastiques « mous ».

-Détection et relocalisation de changements locaux/globaux dans des solides en régime de diffusion multiple.

-Interaction son-vorticité dans des cavités réverbérantes.

2- Sur la plateforme KHz:

-Imagerie et monitoring passif sur des ondes de plaque en régime de diffusion multiple. Comparaison avec l'imagerie sismique passive.

-Détection et relocalisation de changements locaux/globaux en régime de diffusion multiple.

-Mesure des paramètres de scattering (libre parcours moyen, constante de diffusion) à partir de données passive sur des plaques en régime de diffusion multiple.

Un axe de recherche qui me tient particulièrement à cœur concerne l'étude de l'interaction son-vorticité en présence de diffusion multiple, qui est une des tâches de l'ANR soumise en novembre 2009 avec Stéfan Catheline. Tous les ingrédients expérimentaux et théoriques sont prêts pour mener ce travail à bien aujourd'hui au LGIT en profitant de l'interaction avec nos collègues théoriciens du LPM²C (Grenoble). C'est ce volet de mon projet de recherche que je choisis de mettre en avant dans la suite de ce rapport.

1- Diffusion multiple et interaction son-vorticité.

Depuis le début des années 90, sous l'impulsion de Roger Maynard, Mathias Fink, Michel Campillo et Bart Van Tiggelen, les chercheurs du LOA (à Paris), du LPM²C et du LGIT (à Grenoble) travaillent ensemble sur le problème de la diffusion multiple [Derode et al, 1995 ; Derode et al, 2003 ; Tourin et al, 1997]. La création au LGIT de l'Equipe d'Acoustique Expérimentale renforcera les interactions entre théoriciens et expérimentateurs sur le thème de la propagation d'ondes en milieu complexe.

Ainsi, ce projet compte à la fois des aspects méthodologiques et des aspects liés à la propagation dans les milieux complexes. Du point de vue méthodologique, nous utiliserons la souplesse des ultrasons pour approfondir l'étude du cône de rétrodiffusion en présence de vorticité et développer l'étude de la DRAWS (Diffusing Reverberant Acoustic Wave Spectroscopy, [De Rosny and Roux, 2001]). Du point de vue du milieu de propagation, les deux outils d'investigation cités plus haut seront appliqués, par exemple, à l'étude du couplage son-vorticité dans une cavité réverbérante.

1.1- Cône de rétrodiffusion cohérente et filament de vorticité

Les ondes acoustiques sont un outil de choix pour déterminer les propriétés d'un fluide de façon non invasive. Dans le cas d'un écoulement, l'interaction son-vorticité a été largement étudiée pour caractériser un champ de vorticité [Lund and Rojas, 1989]. Pour un vortex filamentaire, des travaux théoriques, numériques et expérimentaux, ont été effectués dans l'air [Brilland et al, 2004 ; Blanc-Benon and Dallois, 2001] ou dans l'eau [Colonius et al, 1995 ; Berthet and Lund, 1995 ; Berthet et al, 2003 ; Baudet et al, 1999]. Il est intéressant de noter que les premiers travaux sur le sujet découlent d'une analogie entre la mécanique des fluides et la mécanique quantique [Berry et al, 1980]. En effet, l'interaction entre un flux d'électrons et un filament parcouru par un champ magnétique est équivalente à l'interaction entre une onde de surface et un vortex « de baignoire ». Cette analogie a permis d'utiliser la solution analytique du problème quantique comme une bonne solution du problème acoustique [Berry, 1980].

Du point de vue théorique, l'expression du champ de pression diffusé par un filament de vorticité en réponse à une onde plane incidente s'écrit :

$$p(r, \theta) \propto \exp(-ikr \cos \theta + i\alpha \theta) + F(\theta) \exp(ikr) \quad (1),$$

$$\text{avec } F(\theta) = \frac{\sin(\pi\alpha) \exp(i\theta/2)}{\sqrt{2\pi i k r} \cos(\theta/2)} \quad (2),$$

où k est le nombre d'onde et θ l'angle de diffusion (Fig. 14) entre l'onde incidente et le point d'observation r [Olariu and Popescu, 1985]. Le paramètre acoustique α est directement déduit de l'analogie avec la mécanique quantique $\alpha = \frac{f\Gamma}{c^2}$, où f est la fréquence de l'onde acoustique, c la vitesse du son et Γ la circulation du champ de vitesse [Roux et al, 1997].

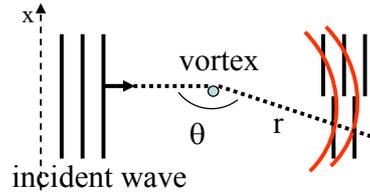


Fig. 14: Description schématique de l'interaction entre une onde plane incidente (  gauche) et un filament de vorticité. Au premier ordre, l'onde plane est déformée à la traversée du vortex. Au deuxième ordre, le front d'onde cylindrique (en rouge) correspond à l'onde diffusée par le cœur du filament.

De récents résultats expérimentaux utilisant des réseaux de transducteurs ultrasonores ont confirmé dans l'eau les pr dictiones théoriques (Fig. 15). Pour un filament de vorticité, l'effet au premier ordre est une déformation de la phase de l'onde incidente (analogue à l'effet quantique [Aharonov-Bohm, 1959]) qui se traduit par une dislocation de l'onde de part et d'autre du cœur du vortex (Fig. 15a). La mesure du paramètre de dislocation $\alpha = Mkr_0$ dépend directement du nombre de Mach de l'écoulement $M = V_{\max}/c$ (où V_{\max} est la vitesse orthoradiale maximale au cœur du vortex) et du produit kr_0 (r_0 , taille du cœur du filament de vorticité).

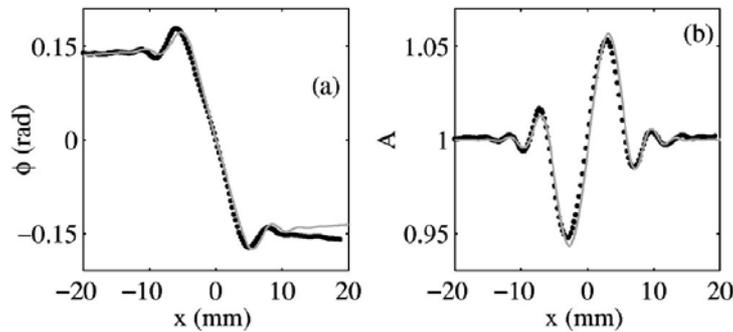


Fig. 15: Comparaison entre données expérimentales (●) et simulées (en gris) pour la déformation de phase (a) et d'amplitude (b) de l'onde incidente plane après traversée d'un filament de vorticité. L'émission acoustique est faite à partir d'une onde plane à 3,5 MHz. Le vortex est tel que $\alpha=0,05$ et $r_0=1,3$ mm. La figure est extraite de [De Rosny et al, 2005].

  la suite de travaux préliminaires effectués avec le LPM²C, mon projet est de mesurer expérimentalement la brisure du cône de rétrodiffusion cohérente dans un vortex filamentaire.

En effet, il a été montré que la présence d'un champ magnétique dans le milieu de propagation viole le théorème de réciprocité pour les ondes optiques, ce qui a pour conséquence l'annulation du phénomène d'interférence constructive donnant naissance au cône de rétrodiffusion cohérente [Lacoste and Tiggelen, 2000 ; Erbacher et al, 1993]. Fort de l'analogie champ magnétique – champ de vorticité pour les ondes acoustiques, Julien De Rosny a d j mis en évidence la disparition du cône de rétrodiffusion cohérente pour un vortex en rotation solide dans une cavité chaotique [De Rosny et al, 2005].

Cependant, il existe de grandes différences topologiques entre un vortex en rotation solide et un filament de vorticité. Dans le cas d'un vortex filamentaire dont le cœur r_0 est de l'ordre ou plus petit que la longueur d'onde, j'ai montré que l'intensité du cône dépend du nombre de boucles effectuées autour du vortex par chaque rayon acoustique au cours de sa propagation dans la cavité réverbérante. On obtient alors une expression analytique qui décrit l'évolution du cône en fonction de l'intensité du vortex et de la longueur des trajets ultrasonores considérés :

$$I(L, \alpha) = \sum_n P_L(n) (1 + \cos(4\pi n \alpha)) \quad (3)$$

Dans cette expression, $I(L, \alpha)$ est le rapport entre le maximum du cône et le niveau de base; n est le nombre de boucles effectuées autour du vortex par un rayon acoustique émis et reçu par le même transducteur lors de son trajet dans la cavité; $P_L(n)$ est la probabilité qu'un trajet acoustique de longueur L fasse n boucles autour du vortex. C'est le facteur $\cos(4\pi n \alpha)$ dans l'Eq. (3) qui est à l'origine de la disparition du cône de rétrodiffusion cohérente. Il représente le déphasage entre un chemin multiplement réverbéré et son conjugué, c'est-à-dire le même chemin parcouru dans le sens contraire. Ce déphasage observé entre des rayons acoustiques identiques parcourus dans des sens opposés est une conséquence de la violation du théorème de réciprocité en présence de vorticité.

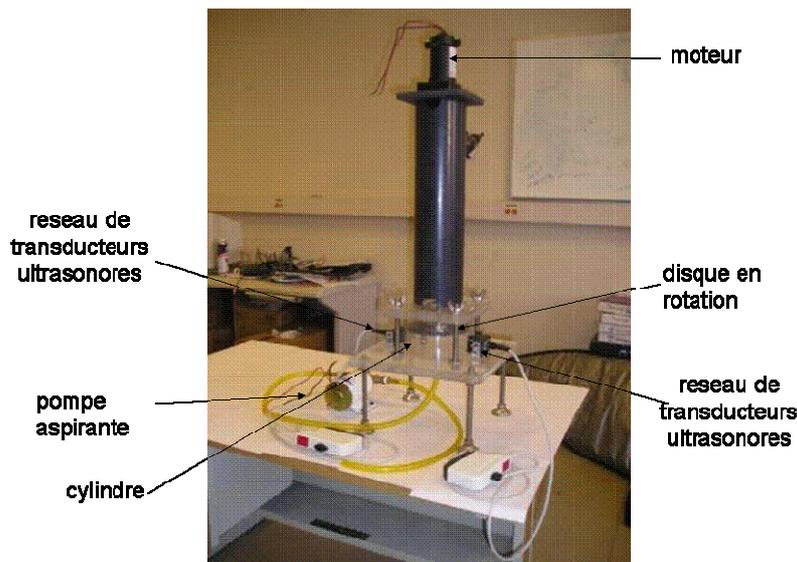


Fig. 16 : Dispositif expérimental ultrasonore pour la mesure DRAWS d'un vortex filamentaire.

L'idée de l'expérience est de créer un vortex filamentaire stable dans un milieu qui se comporte comme un milieu fortement réverbérant pour une onde ultrasonore. Le dispositif expérimental s'inspire de celui utilisé pendant ma thèse lors de l'étude de l'interaction son-vorticité [Roux et al, 1997]. La cavité chaotique est un cylindre de diamètre 14 cm dont la paroi métallique présente une rugosité 1-D ce qui provoque une réflexion aléatoire des ondes acoustiques dans le plan perpendiculaire à l'axe du cylindre. L'onde ultrasonore —émise et reçue par un réseau de transducteurs dans un plan perpendiculaire à l'axe du cylindre— interagit à la fois avec les parois rugueuses et avec un filament de vorticité créé au centre du cylindre. Le vortex est forcé par la rotation d'un disque, qui entraîne le fluide en rotation ; et une aspiration par un trou dans le bas de la « chambre à vortex » qui concentre la vorticité sur un filament de taille submillimétrique.

Le débit d'aspiration et la vitesse de rotation du disque sont contrôlés par l'expérimentateur via le port série d'un PC, et peuvent varier de 0 à 5 l/min et de 0 à 20 Hz, respectivement. Notons que dans le montage de la Fig. 16, la petite taille de la cavité réverbérante permet de confiner le champ diffus dans le plan des transducteurs ultrasonores, ce qui nous affranchit d'éventuels effets parasites 3-D liés au vortex.

Notre ambition est de mesurer $I(L, \alpha)$ pour des valeurs de α allant de 0 à 0,25 pour des ondes ultrasonores au MHz. Ainsi, à partir de l'Eq. (3), une transformée en cosinus inverse nous donnera la distribution du nombre de trajets connexes $P_L(n)$ autour du défaut topologique qu'est le filament de vorticité. Des prédictions numériques pour $P_L(n)$ ont été effectuées que nous tâcherons de confirmer expérimentalement.

De façon pratique, le paramètre α est mesuré entre deux réseaux plans de transducteurs ultrasonores (placés face à face et de part et d'autre du vortex) par la déformation de phase d'une onde plane incidente (Fig. 14). Ainsi, l'utilisation de deux réseaux de transducteurs permet de mesurer en temps réel à la fois l'intensité du vortex via le paramètre α (expérience en transmission) et le cône de rétrodiffusion cohérente (expérience en rétrodiffusion).

1.2- DRAWS et filament de vorticité

J'ai montré récemment avec Julien de Rosny [De Rosny and Roux, 2001 ; De Rosny and Roux, 2004 ; De Rosny et al 2003 ;] que la théorie de la diffusion multiple permettait de caractériser un ensemble de diffuseurs en mouvement dans une cavité réfléchissante. La Diffusing Reverberant Acoustic Wave Spectroscopy (DRAWS) est une extension de la classique DAWS au cas de diffuseurs faibles piégés dans une cavité. L'idée est d'utiliser une cavité réverbérante pour forcer l'onde à interagir le plus longtemps possible avec les diffuseurs présents dans le milieu. On passe ainsi d'un régime de diffusion simple à un régime de diffusion multiple dans la coda du signal enregistré, ce qui permet de mesurer le libre parcours moyen des diffuseurs dans le volume considéré. Dans le cas d'un seul diffuseur, le libre parcours moyen donne directement la section efficace totale de diffusion élastique.

Un vortex filamentaire est l'exemple classique de diffuseur trop faible pour être caractérisé par la DAWS mais dont la signature acoustique peut être obtenue par la DRAWS. En effet, les Eq. (1) et (2) montrent que l'onde diffusée par le cœur du vortex (Fig. 14) est d'amplitude $20 \log_{10} \left(\frac{\sin(\pi\alpha)}{\sqrt{2\pi kr}} \right) = -46\text{dB}$ pour des paramètres réalistes

$\alpha=0,1$ et $kr=600$. Cette onde est souvent trop faible pour être isolée de l'onde incidente disloquée à la traversée du vortex. Il est ainsi intéressant de mettre en rapport l'ensemble des travaux théoriques ou numériques effectués [Colonus et al, 1994] sur la diffusion acoustique par un vortex avec le peu d'expériences permettant de mesurer sa section efficace de diffusion [Manneville et al, 2001].

Notre ambition est d'utiliser la DRAWS pour combler ce manque. En utilisant le montage expérimental de la Fig. 16, nous cherchons ainsi à mesurer la section efficace de diffusion acoustique d'un filament de vorticité sur une plage de fréquence allant de 0,5 à 5 MHz.

La DRAWS se base sur le principe que le rapport entre l'intensité cohérente $I_c(t)$ et l'énergie incohérente $I_i(t)$ diffusée par un diffuseur en mouvement dans uneavit  réverbérante s'écrit :

$$R(t) = \frac{I_c(t)}{I_i(t)} = \exp\left(-\frac{ct\sigma_t}{V}\right), \quad (4)$$

où σ_t est la section efficace de diffusion du diffuseur et V le volume de laavit . Dans le cas d'un vortex filamentaire, le déplacement du cœur du vortex est obtenu à l'échelle de la longueur d'onde en modulant légèrement la vitesse de rotation du disque autour d'une valeur moyenne, ceci provoquant une précession du filament de vorticité à la fréquence de la modulation.

Par ailleurs, les Eqs. (1) et (2) donnent une prédiction pour la section efficace de diffusion d'un vortex :

$$\sigma_t = \int |F(\theta)|^2 r d\theta = \int_0^{\theta_0} \frac{\sin^2(\pi\alpha)}{\pi k \cos^2(\theta/2)} d\theta, \quad (5)$$

où θ_0 correspond à la limite de validation de l'Eq. (1), $\theta_0 = \pi - (2/kr)^{1/2}$. Comme le filament de vorticité est infini suivant l'axe du cylindre, sa section efficace de diffusion 2-D est une distance. En utilisant des transducteurs ultrasonores à 1,5 MHz et le paramètre de dislocation $\alpha=0,1$, nous avons $\sigma_t = 0,485$ mm en négligeant la contribution de la direction incidente à la section efficace de diffusion. Ainsi, à partir des Eqs. (4) et (5), la pente de l'exponentielle décroissante $R(t)$ dans une mesure DRAWS sera $\frac{10}{\log(10)} \frac{\sigma_t c}{V} = 0,35$ dB/ms, où $V=\pi R^2$ correspond à la section du cylindre de notreavit  réverbérante acoustique à 2-D.

Selon ces prédictions, les ingrédients nécessaires pour effectuer une mesure DRAWS avec succès sur un vortex filamentaire sont :

- 1- au moins 2 ms de réverbération acoustique dans la « chambre à vortex ».
- 2- une moyenne du rapport intensité cohérente sur intensité incohérente $R(t)$ effectuée sur un grand nombre de paires de sources/récepteurs pour mesurer la pente de $R(t)$ avec une précision suffisante.

La configuration expérimentale de la Fig. 16 est optimale pour cette mesure DRAWS et la souplesse de la manip nous permettra ainsi de mesurer la section efficace de diffusion d'un vortex filamentaire sur une large plage de fréquence.

Références

Y. Aharonov and D. Bohm (1959), “Significance of electromagnetic potentials in the quantum theory”, *Phys. Rev.* 115, pp. 485-491.

C. Baudet, O. Michel and W. Williams (1999), “Detection of coherent vorticity structures using time-scale resolved spectroscopy”, *Physica D.* 128, pp. 1.

M.V. Berry (1980), “Exact Aharonov-Bohm wavefunction obtained by applying Dirac’s magnetic phase factor”, *Eur. J. Phys.* 1, pp. 240-244.

M.V. Berry, R.G. Chambers, M.D. Large, C. Upstill and J.C. Walmsley (1980), “Wavefronts dislocations in the Aharonov-Bohm effect and its water wave analogue”, *Eur. J. Phys.* 1, pp. 154-162.

R. Berthet and F. Lund (1995), “The forward scattering of sound by vorticity”, *Phys. Fluids* 7, pp. 2522.

R. Berthet, S. Fauve and R. Labbe (2003), “Study of the sound-vortex interaction; Direct numerical simulations and experimental results”, *Eur. Phys. J., B* 32, pp. 237.

F. Billette and G. Lambaré (1998), Velocity macro-model estimation from seismic reflection data by stereotomography, *Geophys.J.Int.*, vol. 135, pp 671-690.

Ph. Blanc-Benon and L. Dallois (2001), “Scattering of sound by a core vortex: Numerical simulations using a wide angle parabolic equation”, *J. Acoust. Soc. Am.* 109(5), pp. 2406.

Brenguier, F., N. M. Shapiro, M. Campillo, A. Nercessian, and V.Ferrazzini (2007), “3-D surface wave tomography of the Piton de la Fournaise volcano using seismic noise correlations », *Geophys. Res. Lett.*, 34, L02305.

G. Brillant, F. Chilla and J.F. Pinton (2004), “Transmission of sound through a single vortex”, *Eur. Phys. J., B* 37, pp. 229-239.

M. Campillo and A. Paul (2003), “Long-range correlations in the diffuse seismic coda”, *Science*, 299, 547-549.

T. Colonius, S.K. Lele and P. Moin (1994), “The scattering of sound waves by a vortex: numerical simulations and analytical solutions”, *J. Fluid Mech* 260, pp. 271-298.

F.A. Dahlen, S.H. Hung and G. Nolet (2000), Fréchet kernels for finite-difference traveltimes – I. Theory, *Geophys. J. Int*, vol 141, pp.157-174.

F.A. Erbacher, R. Lenke and G. Maret (1993), *Europhys. Lett.*, 21, pp. 551.

M.V. de Hoop and R.D. van der Hilst (2005), On sensitivity kernels for wave-equation transmission tomography, *Geophys. J. Int.*, vol. 160, pp 621-633.

Arnaud Derode, Philippe Roux and Mathias Fink (1995), « Time reversal of ultrasonic waves in multiscattering media », *Phys. Rev. Lett.*, Vol.75, N.23, pp. 4206-4209.

A. Derode, E. Larose, M. Tanter, J. De Rosny, A. Tourin, M. Campillo and M. Fink (2003), « Recovering the Green’s function from the field-field correlations in an open scattering medium (L) », *J. Acoust. Soc. Am.*, 113, 2973-2976.

Julien De Rosny and Philippe Roux (2001), “Multiple scattering in a reflecting cavity : Application to fish counting in a tank”, *J. Acoust. Soc. Am.*, 109 (6), pp. 2587-2597.

Julien de Rosny, Arnaud Tourin, Arnaud Derode, Philippe Roux, and Mathias Fink (2005), “Weak localization and time reversal of ultrasound in a rotational

flow”, Phys. Rev. Lett, 95, 074301.

Julien De Rosny, Philippe Roux, Mathias Fink and J.H. Page (2003), “Field fluctuation spectroscopy in a reverberant cavity with moving scatterers”, Physical Review Letters, Phys. Rev. Lett., 90 (9), 094302.

Julien De Rosny and Philippe Roux (2004), “Reply to a Comment on “Multiple scattering in a reflecting cavity: Application to fish scattering”, JASA, 109 (6), 2001”, J. Acoust. Soc. Am. 115 (1), pp. 31-34.

Bérénice Froment, Michel Campillo, Philippe Roux, Pierre Gouédard, Arie Verdel and Richard Weaver (2009), “Estimation of the effect of non-isotropically distributed energy on the apparent arrival time in correlations”, submitted to Geophysics.

J.L. Genisson, C. Cornu, S. Catheline, M. Fink and P. Portero (2005), J. Biomech. 38, 1543.

Pierre Gouedard, Philippe Roux and Michel Campillo (2008a), « Small Scale seismic inversion using surface waves extracted from noise cross-correlation”, J. Acoust. Soc. Am., 123 (3), EL26-31.

Pierre Gouedard, Cecile Cornou and Philippe Roux (2008b), « Phase-velocity dispersion curves and small-scale geophysics using noise cross-correlation techniques”, Geophys. J. Int., 172, 971-981).

Pierre Gouédard, Philippe Roux, Michel Campillo and Arie Verdel (2008c), « Convergence of the two-point correlation function toward the Green’s function in the context of a seismic prospecting dataset”, Geophysics, Vol. 73, N. 6.

Celine Hadziioannou, Eric Larose, Olivier Coutant, Philippe Roux, and Michel Campillo (2009), “Stability of Monitoring Weak Changes in Multiply Scattering Media with Ambient Noise Correlation: Laboratory Experiments”, J. Acoust. Soc. Am., 125(6), pp. 3688-3695.

S. Husen and E. Kissling (2001) Local earthquake tomography between rays and waves; fat ray tomography, Phys. Earth Planet. Inter., vol. 125, pp 171-191.

Ion Iturbe, Philippe Roux, Jean Virieux and Barbara Nicolas (2009a), « Travel-time Sensitivity Kernels vs diffraction pattern obtained through double beamforming in shallow water”, J. Acoust. Soc. Am., 126 (2), pp. 713-720.

Ion Iturbe, Philippe Roux, Barbara Nicolas, Jean Virieux, and Jerome Mars (2009b), “Shallow water acoustic tomography performed from a double beamforming algorithm”, IEEE Journal of Oceanic Engineering, 34 (2), 140-149.

Iturbe (2010), Tomographie acoustique haute resolution dans un guide d’onde océanique, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.

Kang TS, Shin JS (2006), “Surface-wave tomography from ambient seismic noise of accelerograph networks in southern Korea”, Geophys. Res. Lett. 33, L17303.

D. Lacoste, B. Van Tiggelen (2000), Phys. Rev. E, 61, pp. 4556.

Lin FC, Ritzwoller MH, Townend J, et al. (2007) “Ambient noise Rayleigh wave tomography of new Zealand”, Geophys. J. Int. 170, 649-666.

O. I. Lobkis and R. L. Weaver (2001), “On the emergence of the Green’s function in the correlations of a diffuse field”, J. Acoust. Soc. Am., 110, 3011-3017.

F. Lund and C. Rojas (1989), “Ultrasound as a probe of turbulence”, Physica D, 37, pp. 508.

Sébastien Manneville, Philippe Roux, Mickaël Tanter, Agnès Maurel, Mathias Fink, Frédéric Bottausci, and Philippe Petitjeans (2001), « Scattering of

sound by a vorticity filament: An experimental and numerical investigation », *Phys. Rev. E*, 63, 036607.

mental and numerical investigation », *Phys. Rev. E*, 63, 036607.

C. Marandet, P. Roux, B. Nicolas and J.I. Mars (2010), Target detection and localization in shallow water: an experimental demonstration of the acoustic barrier problem at the laboratory scale, *J. Acoust. Soc. Am.*, submitted.

R. Montelli and G. Nolet and F. A. Dahlen and G. Masters and E. R. Engdahl and S. H. Hung (2004), Finite-frequency tomography reveals a variety of plumes in the mantle, *Science*, vol. 303, pp 338-343.

W. Munk, P. Worcester P and C. Wunsch (1995), Ocean Acoustic Tomography. Cambridge: Cambridge Univ.Press.

G. Nolet and F.A. Dahlen and R. Montelli (2005), Traveltimes and amplitudes of seismic waves: a re-assessment, AGU Monograph Series.

S. Olariu and I. Iovitzu Popescu (1985), “The quantum effects of electromagnetic fluxes”, *Reviews of Modern Physics*, 57 (2), pp. 339-436.

C. Orizio (1993), *Crit. Rev. Biomed. Eng.*, 21, 201.

Pedersen HA, Kruger F (2007) “Influence of the seismic noise characteristics on noise correlations in the Baltic shield”, *Geophys. J. Int.* 168, 197-210.

Poupinet, G., Ellsworth, W. L. and Frechet, J. (1984), “Monitoring Velocity Variations in the Crust Using Earthquake Doublets: an Application to the Calaveras Fault”, California, *J. Geophys. Res.* **89**, 5719.

C. Prada, M. Fink (1995), “Selective Focusing through inhomogeneous media: the D.O.R.T. method”, *IEEE Ultrasonic Symp.*, pp 1449-1453.

P. Roux, J. De Rosny, M. Tanter and M. Fink (1997), “The Aharonov-Bohm effect revisited by an acoustic time-reversal mirror”, *Phys. Rev. Lett.*, 79 (17), pp. 3170-3173.

Roux, P., W.A. Kuperman, and the NPAL Group (2004a), Extracting coherent wavefronts from acoustic ambient noise in the ocean, *J. Acoust. Soc. Am.*, 116, pp. 1995-2003.

Philippe Roux, W.A. Kuperman, W.S. Hodgkiss, Hee Chun Song, Tuncay Akal and Mark Stevenson (2004b), “A non reciprocal implementation of time reversal in the ocean”, *J. Acous. Soc. Am.*, 116 (2), pp. 109-1015.

Philippe Roux, Karim G. Sabra, W.A. Kuperman and Andre Roux (2005), “Ambient noise cross-correlation in free space: theoretical approach”, *J. Acoust. Soc. Am.* 117(1), pp. 79-84.

Philippe Roux, Bruce D. Cornuelle, W.A. Kuperman and W.S. Hodgkiss (2008), “The structure of ray-like arrivals in a shallow water waveguide”, *J. Acoust. Soc. Am.*, 124 (6), pp. 3430—3439.

Roux, P. (2009), “Passive seismic imaging with directive ambient noise: Application to surface waves on the San Andreas Fault (SAF) in Parkfield”, *Geophysical Journal International*, 179 (1), pp. 367-373.

Karim G. Sabra, Philippe Roux, Aaron M. Thode, Gerald L. D’Spain, W.S. Hodgkiss and W.A. Kuperman (2005a), “Using ocean ambient noise for array self-localization and self-synchronization”, in press, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*.

Karim G. Sabra, Philippe Roux and W.A. Kuperman (2005b), “Arrival structure of the time-averaged ambient noise cross-correlation function in an oceanic waveguide”, *J. Acoust. Soc. Am.* 117(1), pp. 164-174.

K. Sabra, S. Conti, P. Roux and W.A. Kuperman (2007), “Passive in vivo elastography from skeletal muscle noise”, *Applied Physics Letters* 90, 194101.

E. K. Skarsoulis and B.D. Cornuelle (2004), Travel-time sensitivity kernels in ocean acoustic tomography, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 116(1), pp. 227-238.

Shapiro, N.M., M. Campillo, L. Stehly and M.H. Ritzwoller (2005), High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise, *Science* 29, 1615-1617.

R. Snieder (2004), “Extracting the Green’s function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase”, *Phys. Rev. E*, 69, 046610.

H. Song, W. Kuperman, W. Hodgkiss, T. Akal and P. Guerrini (2003), “Demonstration of a high frequency acoustic barrier with a time-reversal mirror,” *IEEE J. Oceanic Eng.*, 28, 246–249.

Stehly L., Campillo M., and Shapiro N. M., (2006) “A study of the seismic noise from its long-range correlation properties”, art. no. B10306, *Journal of Geophysical Research Solid Earth*.

L. Stehly, B. Fry, M. Campillo, N.M. Shapiro, J. Guilbert, L. Boschi, D. Giardini (2009), “Tomography Of The Alpine Region from Observations of Seismic Ambient Noise”, *Geophysical Journal International* 178, (1) 338-350.

M. Stevenson, A. Tesei, P. Guerrini, T. Folegot, K. Sabra, P. Roux, H. Song, W. Kuperman, W. Hodgkiss and T. Akal (2007), “An acoustic tripwire based on forward scattering in a time-reversal mirror,” *US Navy J. Underwater Acoust.*, 61, 52–60.

A. Tarantola (1984) “Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation”, *Geophysics*, vol. 49(8), pp. 1259-1266.

Arnaud Tourin, Arnaud Derode, Philippe Roux, Bart Van Tiggelen et Mathias Fink (1997), « Time dependent coherent backscattering of acoustic waves », *Phys. Rev. Lett.*, Vol.79, N.19, pp. 3637-3639

J. Tromp and C. Tape and Q. Liu (2005), Seismic tomography, adjoint methods, time reversal, and banana-donut kernels, *Geophys. J. Int.*, vol. 160, pp 195-216.

J. Virieux and G. Lambaré (2007), Theory and observations - body waves: ray methods and finite frequency effects in *Treatise of Geophysics*, volume 1: Seismology and structure of the Earth, *Treatise of Geophysics* by B. Romanovitz and A. Diewonski, Elsevier, New York.

R. L. Weaver, O. I. Lobkis (2001), “Ultrasonics without a source: Thermal fluctuation correlations at MHz frequencies”, *Phys. Rev. Lett.* 87, 134301.